



Pás de Rotor de Aerogeradores Eólicos em Fim do Ciclo de Vida: Uma Abordagem de Economia Circular

Maria Inês Duarte Iglésias

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial
(2º ciclo de estudos)

Versão Final Após Discussão

Orientadora: Prof.^a Doutora Tânia Daniela Felgueiras de Miranda Lima
Coorientador: Mestre Paulo Sérgio Pina dos Santos

dezembro de 2022

Declaração de Integridade

Eu, Maria Inês Duarte Iglésias, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M11114 do 2º Ciclo em Engenharia e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 20/12/2022

Maria Inês Iglésias

Agradecimentos

À Universidade da Beira Interior por me ter recebido de braços abertos e me ter permitido percorrer esta viagem. À Universidade de Coimbra, Academia do meu coração, em especial ao DEMUC, por ter sido casa nos 3 primeiros anos da minha aventura académica e por me ter acolhido e ajudado, mesmo depois de deixar de percorrer os corredores.

À minha família, Mãe, Pai, Teresinha e Pessoal das Festas, por terem acreditado sempre em mim e terem apoiado a loucura de me mudar para tão longe para seguir EGI. À minha Avó Aline, com A de Avó bem grande, por, mesmo passando o meu primeiro ano inteiro a dizer que eu estava a tirar um curso para ir arranjar carros, esteve sempre lá e, de uma maneira ou de outra, partilhou comigo todas as minhas conquistas.

A Coimbra. Às meninas do 5º Esq, especialmente à Sofs e à Chica, pela companhia e amizade nestes 5 anos. Ao Rolo e ao Maia pelos cafés e cusquices que, mesmo a quase duas centenas de kms de distância, nunca pararam. Às minhas madrinhas e amigas do coração, Jé e Bia, pelos *nuggets* e abraçinhos apertados no momento certo.

À Covilhã. À Sara, ao Vasco e à Ana Gisela por me terem acolhido tão bem e me fazerem sempre sentir em casa, fosse nos cafezinhos ou nas crises existenciais conjuntas. Ao Duarte, ao Parente, à Ana, à Kateryna e especialmente à Filipa. Obrigada por terem tornado a minha aventura no 8.14 numa experiência incrível.

À Luísa pela amizade que dura e perdura, pela companhia e pelos datezinhos nestes 5 (+13) anos. Vais ser sempre a minha engenheira preferida.

Ao Fábio por ter sido o meu melhor amigo e companheiro nesta aventura. Sem ti não teria chegado aqui.

À Inês de há 3 anos que, muito (atenção, muito, muito) contrariada, acabou uma licenciatura em Engenharia Mecânica e lutou pelo sonho de estudar EGI, o meu maior, obrigada. Sem ti, a tua paciência, as tuas noitadas e a tua casmurrice hoje não saberia o quanto este é o meu lugar, nem teria conseguido alcançar metade daquilo que com muito orgulho conquistei.

Aos meus orientadores. Todos os agradecimentos do mundo não seriam suficientes para eles. À Professora Tânia, um grande obrigada por todo o apoio e por acreditar em mim! Levo-a para sempre como referência enquanto pessoa, mentora e professora. Quando for grande espero ser um bocadinho como a Professora. Ao Professor Paulo por todas as horas bem passadas, por todo o apoio e atenção e por tudo o que me ensinou nestes meses. Não podia ter pedido melhor mentor nesta aventura.

E porque ninguém consegue assobiar uma sinfonia e é preciso uma orquestra inteira para a tocar, os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que não referi em específico,

mas que me acompanharam nestes 5 anos e tornaram possível a conclusão de mais um ciclo.
Obrigada.

Resumo

A atual crise climática tem levado à adoção de políticas para uma gestão mais responsável dos recursos naturais. Uma dessas políticas tem se refletido no investimento em fontes de energia renováveis e, devido ao crescimento considerável que estas sofreram, torna-se necessário procurar também soluções que permitam gerir os resíduos que irão resultar da desativação das várias infraestruturas quando estas atingirem o seu fim de ciclo de vida, como por exemplo, dos materiais compósitos das pás de rotor de aerogeradores eólicos.

O objetivo da presente dissertação é aplicar uma abordagem de Economia Circular ao problema do fim do ciclo de vida das pás de rotor, através do ensaio de uma metodologia de reciclagem de laminados de fibras, semelhantes aos encontrados nas pás de rotor, que consiste na queima, a diferentes tempos e temperaturas. Através da fabricação manual de laminados com estas fibras e respetiva caracterização mecânica associada ao seu ensaio, procurou-se estudar formas para a reinserção das fibras recicladas num novo ciclo de vida, fechando o *loop* dos materiais associados às pás de rotor.

Quanto à sua caracterização, nos ensaios de tração as melhores propriedades, tensão, rigidez e deformação, em comparação com o laminado de controlo, correspondem aos tempos mais curtos de queima de cada temperatura ensaiada, no entanto, no caso dos ensaios de flexão em 3 pontos isto não se verificou. Nestes ensaios destacaram-se pelas suas propriedades, em comparação com o laminado de controlo, principalmente pela sua tensão, os laminados de fibras recuperadas a: 400°C durante 180min, 600°C durante 60min. Estes novos laminados foram ainda ensaiados à fluência e à relaxação de tensões, para 50% da sua tensão, tendo sido obtidos valores semelhantes aos do controlo.

Os laminados das fibras recuperadas às temperaturas de 400 °C e 600 °C apresentaram boas características mecânicas, o que poderá permitir a sua reutilização no fabrico de outros materiais, por exemplo, em peças não estruturais na indústria automóvel, visto que perdem até 70% da sua tensão, enquanto que as fibras recuperadas a 800°C apresentam uma degradação excessiva para serem reaproveitadas.

Palavras-chave

Pás de Rotor de Aerogeradores; Compósitos de Fibra de Vidro; Economia Circular; Reciclagem de Materiais Compósitos; Reciclagem Térmica

Abstract

The current climate crisis has led to the adoption of policies for a more responsible management of natural resources. This adoption also involves investment in renewable energy sources and, due to the considerable growth that these have suffered, it has become necessary to seek solutions that allow the management of the waste that will result from the deactivation of the various infrastructures when they reach their end-of-life cycle. life, for example, of the composite materials of the rotor blades of wind turbines.

The objective of this dissertation is to apply a Circular Economy approach to the problem of the end of the life cycle of rotor blades, through the testing of a methodology for recycling fibre laminates, similar to those found in rotor blades, which consists of burning, at different times and temperatures. Through the manual manufacture of laminates with these fibres and the respective mechanical characterization associated with their testing, we sought to open the way for the reinsertion of recycled fibres in a new life cycle, closing the loop of materials associated with rotor blades.

As for its characterization, in the tensile tests the best properties, tension, stiffness and deformation, in comparison with the control laminate, correspond to the shortest burning times of each temperature tested, however, in the case of flexural tests in 3 points this was not verified. In these tests, the laminates of recovered fibres that stood out for their properties, compared to the control laminate, mainly for their tension were 400°C for 180min, 600°C for 60min. These new laminates were also tested for creep and stress relaxation, at 50% of their tension, and values similar to those of the control were obtained. The laminates of fibres recovered from 400 °C and 600 °C burning at temperatures have good mechanical characteristics, which may allow their reuse in the manufacture of other materials, for example, in non-structural parts in the automotive industry, since they lose up to 70% of its tension, while the fibres recovered at 800°C present an excessive degradation to be reused.

Keywords

Wind turbine rotor blades; Fiberglass Composites; Circular Economy; Recycling of Composite Materials; Thermal Recycling

Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Índice.....	xi
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Acrónimos.....	xix
Notação.....	xxi
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 Contextualização do trabalho.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodologia.....	4
1.4 Estrutura da Dissertação.....	5
Capítulo 2.....	7
Setor Eólico.....	7
2.1 As Energias Renováveis.....	7
2.2 Caracterização do Setor Eólico.....	10
2.2.1 Setor Eólico em Portugal.....	11
Capítulo 3.....	15
Economia Circular.....	15
3.1 Desenvolvimento Sustentável.....	15
3.1.1 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	16
3.2 Economia Circular.....	19
Capítulo 4.....	31
Reciclagem de Materiais Compósitos.....	31
4.1 Materiais Compósito.....	31

4.1.1 Tipos de Compósitos	36
4.2 Fibra de Vidro	40
4.3 Tipos de Reciclagem de Compósitos	45
4.3.1 Reciclagem Mecânica	46
4.3.2 Reciclagem Química.....	47
4.3.3 Reciclagem Térmica	48
4.4 Exemplos Práticos de Reaproveitamento de Pás de Rotor	49
Capítulo 5	53
Problemática das Pás de Rotor dos Aerogeradores no Fim de Ciclo de Vida	53
5.1 Componentes e Materiais do Aerogerador Eólico	53
5.2 Ciclo de Vida de um Aerogerador.....	57
Capítulo 6	63
Caso Prático.....	63
6.1 Materiais, Procedimento Experimental e Equipamento	63
6.1.1 Materiais e Procedimento Experimental	63
6.1.2 Equipamentos.....	70
6.2 Análise e Discussão de Resultados.....	73
6.2.1 Ensaios de Tração	73
6.2.2 Ensaios de Flexão em 3 Pontos	82
6.2.3 Ensaios de Fluência e Relaxação de Tensões	99
Capítulo 7	105
Conclusões.....	105
7.1 Conclusões	105
7.2 Limitações	106
7.3 Propostas de Trabalhos Futuros.....	106
Bibliografia	109

Lista de Figuras

Figura 1 – Plano para o alcance da neutralidade carbónica até 2050 (República Portuguesa - Ambiente e Transição Energética, 2019).	7
Figura 2 – Contribuição das FER no consumo de Energia Final ao longo dos anos em Portugal (DGEG, 2022).	8
Figura 3 – Contributo das FER no Consumo de Energia Final em 2020 (DGEG, 2022).	9
Figura 4 - Distribuição da potência instalada renovável em Portugal em maio de 2022 (INEGI, 2022a).	10
Figura 5 – Distribuição dos parques eólicos em Portugal (INEGI, 2022b).	12
Figura 6 – Evolução da Potência Instalada por Distrito entre 2008 e 2020 Adaptado de (INEGI & APREN, 2020; Rodrigues, 2008).	12
Figura 7 – Percentagem de energia elétrica que provém de energia eólica (WindEurope Business Intelligence et al., 2022).	13
Figura 8 – Três dimensões da Sustentabilidade (Bahraini, 2021).	16
Figura 9 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017).	17
Figura 10 – Ícones dos ODS 7 e ODS 12 (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017) ...	18
Figura 11 – Principais benefícios do <i>Ecodesign</i> (Iberdrola, 2022a).	24
Figura 12 – Ciclo de vida de produtos do ponto de vista da responsabilidade do produtor (Jensen & Skelton, 2018).	25
Figura 13 – Exemplo de Diagrama de Borboleta da EC (Silva, 2019).	27
Figura 14 – Hierarquia de Resíduos, adaptado de (Schmid et al., 2020).	28
Figura 15 – Distribuição da utilização de materiais compósitos, em volume (Adaptado de Bernatas et al., 2021).	32
Figura 16 – Diagrama resumo das classificações dos compósitos por tipo de reforço (Altenbach, Altenbach & Wolfgang, 2018; Mitchell, 2003; Callister Jr., 1999).	36
Figura 17 – Diferentes tipos de tecido 2D (Verpoest, 2017).	40
Figura 18 – Fibra de Vidro a) manta de fibra descontínua, b) fio contínuo, c) <i>roving</i> , d) tecido (Chawla, 2019).	41
Figura 19 – Gráfico de Resistência - Densidade dos vários tipos de materiais (Ashby, 2021).	42
Figura 20 – Pegada de carbono a) de diferentes fibras; b) de diferentes materiais, por peso (Ashby, 2021).	43
Figura 21 – Preço e volume anual de produção de vários tipos de fibras (Ashby, 2021).	44
Figura 22 – Fração de material reciclado no abastecimento atual de material (Ashby, 2021).	45

Figura 23 – Classificação dos tipos de reciclagem. Adaptado de Morin et al. (2012).	46
Figura 24 – Exemplos de Reaproveitamento de Pás de Rotor (Krauklis et al., 2021).....	50
Figura 25 – Ilustração dos componentes base de um aerogerador (Iberdrola, 2022b).	53
Figura 26 – Componentes Materiais de um Aerogerador (Dorigato, 2021).....	54
Figura 27 – Distribuição percentual do tipo de material constituinte da pá de rotor, adaptado de Korniejenko et al. (2021).	55
Figura 28 – Expectativa de utilização anual de PRFV em pás de rotor de aerogeradores (Jensen & Skelton, 2018).	56
Figura 29 – Ciclo de Vida das Pás de Rotor (Lee & Zhao, 2021).	58
Figura 30 – Ciclo de vida dos parques eólicos (Golden, 2021).	60
Figura 31 – Diagrama de Borboleta de pás de rotor de aerogerador (Jensen & Skelton, 2018).	60
Figura 32 – Tecido de fibra de vidro utilizado no fabrico dos laminados.	65
Figura 33 – Exemplos de impurezas presentes nas fibras após a reciclagem: a) fibra reciclada a 400°C/15min; b) fibra reciclada a 400°C/60min.	66
Figura 34 – Exemplo de preparação de um laminado a) Durante o processo de fabrico manual; b) dentro do saco.....	67
Figura 35 – Laminado no interior do saco, em vácuo e sujeito a pressão, na prensa hidráulica.	67
Figura 36 – Esquema do ensaio de F3P: a) Dimensões e geometria do provete; b) Montagem do ensaio. Todas as dimensões em mm.	68
Figura 37 – Corte a Jato dos Provetes de Tração do Laminado de Controlo.....	69
Figura 38 – Exemplo da geometria do provete de ensaio à tração: a) Provete preparado para teste; b) Dimensões e geometria do provete em mm.	69
Figura 39 a) Máquina de teste universal da marca Shimadzu, modelo AGS-X de célula de carga 10kN; b) Dispositivo de fixação para ensaio de flexão em 3 pontos, dinâmico e estático.	70
Figura 40 – a) Máquina de teste universal da marca Shimadzu, modelo AGS-X de célula de carga 100kN; b) Dispositivo de fixação para ensaio de tração e extensómetro.	72
Figura 41 - Curvas de σ - ϵ do laminado de controlo em ensaio de tração.	73
Figura 42 - Fotografia de um provete dos laminados de controlo após ensaio de tração. ..	74
Figura 43 – Curvas representativas de σ - ϵ do ensaio de tração dos laminados de fibras recuperadas a 400°C com diferentes tempos de queima.	75
Figura 44 - Propriedades obtidas nos ensaios de tração dos laminados de fibras recuperadas a 400°C com diferentes tempos de queima: a) tensão máxima; b) rigidez; c) deformação.....	76

Figura 45 - Fotografia de um provete do laminado de fibras recuperadas a 400°C durante 180 minutos após ensaio de tração.	77
Figura 46 - Curvas representativas de σ - ϵ do ensaio de tração dos laminados de fibras recuperadas a 600°C com diferentes tempos de queima.....	77
Figura 47 - Propriedades obtidas nos ensaios de tração dos laminados de fibras recuperadas a 600°C com diferentes tempos de queima: a) tensão máxima; b) rigidez; c) deformação.	79
Figura 48 – Fotografia de um provete do laminado de fibras recuperadas a 600°C durante 30 minutos após ensaio de tração.	80
Figura 49 - Curvas representativas de σ - ϵ do ensaio de tração dos laminados de fibras recuperadas a 800°C com diferentes tempos de queima.	80
Figura 50 - Propriedades obtidas nos ensaios de tração dos laminados de fibras recuperadas a 800°C com diferentes tempos de queima: a) tensão máxima; b) rigidez; c) deformação.	81
Figura 51 – Fotografia de um provete do laminado de fibras recuperadas a 800°C durante 10 minutos após ensaio de tração.....	82
Figura 52 – Curvas de σ - ϵ do laminado de controlo em teste de F3P a uma velocidade de 2mm/min.	83
Figura 53 – Fotografia de um provete do laminado de controlo após ensaio de F3P à velocidade de 2mm/min.....	83
Figura 54 – Curvas representativas de σ - ϵ do ensaio de F3P dos laminados de fibras recuperadas a 400°C em diferentes tempos de queima à velocidade de 2mm/min.	84
Figura 55 – Propriedades obtidas nos ensaios de F3P dos laminados de fibras recuperadas a 400°C em diferentes tempos de queima: a) Tensão de flexão; b) Rigidez de flexão; c) Deformação de flexão.	85
Figura 56 – Fotografia de um provete do laminado de fibras recuperadas a 400°C durante 120 minutos após ensaio de F3P à velocidade de 0,02mm/min.....	86
Figura 57 – Curvas representativas de σ - ϵ do ensaio de F3P das diversas combinações para 600°C à velocidade de 2mm/min.	86
Figura 58 – Propriedades obtidas nos ensaios de F3P dos laminados de fibras recuperadas a 600°C com diferentes tempos de queima: a) Tensão de flexão; b) Rigidez de flexão; c) Deformação de flexão.	87
Figura 59 –Fotografia de um provete do laminado de fibras recuperadas a 600°C durante 60 minutos após ensaio de F3P à velocidade de 0,02mm/min.	88
Figura 60 – Curvas representativas de σ - ϵ do ensaio de F3P dos laminados de fibras recuperadas a 800°C com diferentes tempos de queima à velocidade de 2mm/min.	89

Figura 61 – Propriedades obtidas nos ensaios de F3P dos laminados de fibras recuperadas a 600°C com diferentes tempos de queima: a) Tensão de flexão; b) Rigidez de flexão; c) Deformação de flexão.....	90
Figura 62 – Fotografia de um provete do laminado de fibras recuperadas a 800°C durante 10 minutos após ensaio de F3P à velocidade de 200mm/min.	91
Figura 63 - Curva σ - ϵ representativas para laminado de controlo para as diferentes taxas de deformação.	92
Figura 64 – a) Curvas σ - ϵ representativas para laminado de fibras recuperadas a 400°C durante 180 minutos para as diferentes taxas de deformação; Efeito da taxa de deformação: b) Tensão de flexão; c) Rigidez de flexão; d) Deformação de flexão.....	94
Figura 65 a) Curvas σ - ϵ representativas para laminado de fibras recuperadas a 600°C durante 60 minutos para as diferentes taxas de deformação; Efeito da taxa de deformação: b) Tensão de flexão; c) Rigidez de flexão; d) Deformação de flexão.....	96
Figura 66 - a) Curvas σ - ϵ representativas para laminado de fibras recuperadas a 800°C durante 10 minutos para as diferentes taxas de deformação; Efeito da taxa de deformação: b) Tensão de flexão; c) Rigidez de flexão; d) Deformação de flexão.....	97
Figura 67 – Curvas de relaxação de tensões para os laminados de: a) Controlo, b) 400°C/180min, c) 600/60min, d) 800°C/10min.....	100
Figura 68 - Gráficos de Deslocamento-Tempo de ensaios de fluência a) Controlo, b) 400°C/180min, c) 600/60min, d) 800°C/10min.....	103

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Análise comparativa dos modelos de Economia Circular e Linear Adaptado de (Gureva & Deviatkova, 2020).....	20
Tabela 2 – Principais definições de Economia Circular (Homrich et al., 2018).....	21
Tabela 3 – Características dos principais tipos de fibra de vidro (Krauklis et al., 2021; Ngo, 2020; Biron, 2013).	41
Tabela 4 – Quadro resumo de diversos estudos sobre o reaproveitamento de PRFV.	49
Tabela 5 – Estimativa dos resíduos que irão ser gerados anualmente com fim do ciclo de vida dos parques eólicos de 1ª geração (INEGI, 2022a; Larsen, 2009)	57
Tabela 6 – Combinações de temperatura e tempo de queima utilizadas.....	63
Tabela 7 – Propriedades da matriz, adaptado de (Sicomín, 2019).	64
Tabela 8 – Propriedades da Fibra de Vidro (Rebelco, n.d.).....	65
Tabela 9 – Taxa de deformação associado às diferentes temperaturas, tendo em conta a velocidade.	71
Tabela 10 – Variação da tensão nos ensaios de F3P e tração.....	91
Tabela 11 – Parâmetros da equação que representa o efeito da taxa de deformação.	98
Tabela 12 – Comportamento em termos de relaxação de tensões dos laminados em estudo.	101
Tabela 13 – Comportamento em termos de fluência dos laminados em estudo.	103

Lista de Acrónimos

ACV	Análise de Ciclo de Vida
C2C	<i>Cradle to Cradle</i>
CNC	Controlo Numérico Computorizado
CMC	Compósitos de Matriz Cerâmica
CV	Ciclo de Vida
DGEG	Direção-Geral de Energia e Geologia
F3P	Flexão em 3 pontos
FC	Fibra de Carbono
FCV	Fim de Ciclo de Vida
FER	Fontes de Energia Renováveis
FV	Fibra de Vidro
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCI	<i>Low Carbon Infrastructure</i>
MMC	Compósito de Matriz Metálica
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PCH	Pequenas Centrais Hidroelétricas
PMC	Compósito de Matriz Polimérica
PRFV	Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

Notação

Caracteres latinos

A	Área da secção transversal do provete
b	Largura do provete
c	Constante
d	Constante
E	Módulo de Rigidez ou Módulo de Young ou Módulo de Elasticidade
$\dot{\epsilon}$	Logaritmo da taxa de deformação
h	Espessura do provete
I	Momento de inércia
L	Distância entre apoios ou <i>span</i>
P	Carga
R	Coefficiente de correlação
S	Deflexão do provete na flexão
t	Espessura média do material
V_t	Velocidade do terceiro ponto

Símbolos gregos

ϵ	Deformação
$\dot{\epsilon}$	Taxa de Deformação
ϵ_f	Deformação periférica à flexão da fibra
ΔP	Variação de Carga
Δu	Variação de deslocamento
σ	Tensão

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é apresentada a contextualização do tema, de modo a introduzir o trabalho desenvolvido, são definidos os objetivos e a metodologia utilizada, assim como a estrutura da presente dissertação.

1.1 Contextualização do trabalho

Cada vez mais, o ambiente e o impacto da vida humana na Terra são temas discutidos na esfera política. Isto deve-se à atual crise climática, resultante do excesso de poluição causada pelo ser humano e da má gestão dos recursos naturais. Esta crise climática tem aumentado a preocupação da sociedade e a sua percepção da emergência climática, nomeadamente em aspetos como os efeitos a longo prazo das ações presentes, o consumo de combustíveis fósseis e a crise energética que pode resultar desta dependência, mas também da crescente quantidade de poluição resultante da atividade humana, entre outros (Edirisuriya, Weerabahu & Wickramarachchi, 2018; Peña, Azevedo & Ferreira, 2017).

Segundo o Doutor Filipe Duarte Santos (Programa Cautelar, 2021), pode dizer-se que, atualmente, a luta pela sustentabilidade é conduzida a duas velocidades e, por isso, cabe aos países mais desenvolvidos agir e assumir o compromisso de encontrar estratégias que visem travar a crise climática, mantendo sempre como principal objetivo a garantia de um desenvolvimento sustentável por parte de todos os países. Atualmente, estão em vigor os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), que visam garantir um Desenvolvimento Sustentável global através do concentrar de esforços dos diversos países para alcançar um bem comum. Estes objetivos representam as mais diferentes temáticas, os quais incluem, mudanças nos padrões de consumo e Economia Circular (ODS 12) e a implementação de medidas que contribuam para uma sociedade e comunidades mais sustentáveis, por exemplo, através de uma mudança na forma como estas percebem e utilizam as energias renováveis (ODS 7 e 11) (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017).

Estas mudanças na percepção e hábitos das comunidades têm levado ao desenvolvimento de estratégias, que incorporam os conceitos de Desenvolvimento Sustentável e que procuram atingir um equilíbrio entre as suas necessidades e o ambiente que as rodeia. Estas estratégias podem passar pela adoção de alternativas aos combustíveis fósseis, políticas de

incentivo a alternativas mais verdes para diversos materiais ou fontes energéticas ou à instalação de mais infraestruturas de baixo carbono, ou *Low Carbon Infrastructures* (LCI). Estas LCI são infraestruturas ou componentes de sistemas, que de algum modo se possam traduzir na geração, transporte ou distribuição de energia proveniente de fontes renováveis, podendo ser, por exemplo, painéis fotovoltaicos ou turbinas eólicas e os seus respetivos canais de distribuição para a rede energética, estando estas cada vez mais presentes a nível global, devido à crescente necessidade de descarbonização da produção energética (Jensen, Purnell & Velenturf, 2020).

O crescimento da popularidade e necessidade das energias renováveis levou a um crescimento considerável destas em Portugal, também incentivado por iniciativas europeias de combate à crise climática. Atualmente, o objetivo imposto pela União Europeia para 2030 é que 27% da energia utilizada passe a ser de origem renovável, procurando assim diminuir as emissões de gases associados ao efeito de estufa em cerca de 90% até 2050 (Baturkin et al., 2021).

Atualmente, cerca de 30% da energia elétrica consumida em território nacional provem de energia eólica, tornando Portugal no 3º país europeu com a maior percentagem de energia eólica face à energia elétrica consumida, estando, portanto, bastante acima da média europeia (WindEurope Business Intelligence et al., 2020). No entanto, no que toca ao consumo de energia final, em Portugal, no ano de 2020, a energia eólica apenas representou 18% das energias renováveis, ou seja, 5,76% do consumo energético final (DGEG, 2022). Ainda que estes valores representem uma fatia muito pequena da produção energética portuguesa, desde 2009 verificou-se um crescimento de cerca de 50% da potência instalada proveniente de aerogeradores (DGEG, 2022, 2021d).

Ainda que as turbinas eólicas não emitam gases para a atmosfera durante a sua operação, quando estas atingem o fim do seu ciclo de vida poderão ter um impacto ambiental muito significativo. Este problema reside principalmente nas pás de rotor dos aerogeradores, visto que a torre e outras partes são geralmente reaproveitadas ou recicladas. Enquanto que as pás não são reaproveitadas devido à sua elevada durabilidade e características mecânicas do material, o que se traduz num período de tempo muito longo até se degradarem, hoje em dia já existe regulamentação específica e meios que permitam o reaproveitamento ou deposição dos restantes componentes, nomeadamente as torres e outros resíduos de construção (Presidência do Conselho de Ministros, 2020). A crescente adoção de materiais compósitos na construção, aeronáutica e transportes, devido às suas características mecânicas e elétricas aliadas à baixa densidade do material, levam a que, no final de vida

das estruturas surja uma grande dificuldade em que estas se degradem e em definir processos de reciclagem viáveis. Por isso, cada vez mais, se procura encontrar alternativas à deposição em aterro destes elementos dos aerogeradores (Dorigato, 2021; Baturkin et al., 2021; Callister Jr., 1999).

Estas alternativas residem principalmente na reutilização ou na reciclagem, ainda que a segunda não seja tão comum devido à perda de características mecânicas, procurando assim adotar uma estratégia de Economia Circular para que os aerogeradores em fim de ciclo de vida útil possam ser reaproveitados.

Nos últimos anos, foram efetuados diversos estudos sobre as possibilidades de reaproveitamento dos materiais, desde a sua queima para a produção de energia, a estudos de diversos tipos de reciclagem que se poderiam aplicar nos materiais, assim como da recetividade para a utilização destes novos materiais que podem perder até 60% das características iniciais (Dorigato, 2021; Fonte & Xydis, 2021). Sendo que a fibra de vidro representa uma grande fonte de sílica, esta é recorrentemente incorporada em misturas de betão, após sofrer reciclagem mecânica (Baturkin et al., 2021). No entanto, ainda que represente uma boa solução, também para a diminuição da pegada ecológica associada à indústria do cimento e betão, esta abordagem ao reaproveitamento do material não rentabiliza as suas características mecânicas e gera produtos de baixo valor acrescentado. Por isso, vários autores têm vindo a desenvolver estudos sobre a possibilidade de utilizar fibras que resultem de reciclagem térmica ou química, ainda que muitos dos processos que se traduzem num melhor aproveitamento das fibras apresentem uma grande dificuldade em ser ampliadas para a escala industrial (Dorigato, 2021).

Assim, esta dissertação tem como objetivo dar continuidade aos estudos que já têm vindo a ser desenvolvidos sobre a reciclagem das fibras de vidro, presentes nas pás de rotor dos aerogeradores, e procurar identificar oportunidades de aplicação dos reciclados para que o seu ciclo de vida tenha uma abordagem mais sustentável e mais direcionado para uma estratégia de Economia Circular.

1.2 Objetivos

Esta dissertação baseia-se na aplicação de uma abordagem de Economia Circular ao problema do fim do ciclo de vida das pás de rotor dos aerogeradores, focando-se principalmente no reaproveitamento de fibras de vidro recicladas para novas utilizações e nos desafios e oportunidades que este representa. Tem como objetivo a avaliação da possibilidade de reinserção das fibras de vidro, provenientes da reciclagem de materiais

semelhantes aos presentes em pás de rotor, noutros compósitos, permitindo assim que o ciclo de vida destas se encerre.

Foram definidos os seguintes objetivos específicos para esta dissertação:

- Realização de uma revisão bibliográfica sobre as temáticas em estudo, nomeadamente sobre a Economia Circular, a problemática, a importância das energias renováveis, as características dos materiais compósitos e o ciclo de vida dos materiais compósitos;
- Caracterização do setor da Energia Eólica em Portugal;
- Exposição da importância da Economia Circular como possível solução para a problemática do fim de ciclo de vida dos materiais;
- Produção de laminados de fibra de vidro e resina epóxi, tendo por base fibras recicladas;
- Realização de ensaios mecânicos aos laminados;
- Análise dos dados resultantes do ensaio dos laminados;
- Propostas para a utilização de fibras de vidro recicladas em outros materiais para encerrar o ciclo de vida das pás de rotor de aerogeradores.

1.3 Metodologia

Atualmente, define-se Ciência como sendo um conjunto sistemático e organizado de conhecimento, ainda que apenas se pode dizer que este se traduza corretamente em Ciência se tiver sido adquirido através do Método Científico. O Método Científico é um conjunto normalizado de técnicas e ferramentas que permitem adquirir conhecimento científico, permitindo aos investigadores que estes façam observações e testem teorias de modo imparcial e independente(Bhattacharjee, 2012).

Assim, sendo a investigação científica baseada em teorias e observações, esta foca-se tanto na componente teórica, como na componente prática a si associada, resultado de diversos métodos que podem ser aplicados e perspectivas que podem ser adotadas. No desenvolvimento de um projeto de investigação, existe então um conjunto de seis etapas que devem ser estabelecidas para que a investigação científica se traduza num sucesso, nomeadamente, a definição do problema, a revisão da literatura e a análise e interpretação dos dados recolhidos. Estes dados podem ser recolhidos recorrendo a diversos métodos e modelos de análise (Bhattacharjee, 2012).

Assim, no âmbito desta dissertação, optou-se por um tipo de investigação dedutivo, ou seja, através da fabricação de laminados semelhantes aos que se podem encontrar nas pás de

rotor dos aerogeradores e da sua caracterização com recurso a ensaios mecânicos, procurar-se-á encontrar e identificar oportunidades e soluções de reaproveitamento dos mesmos.

Para a revisão bibliográfica, foram utilizadas bases de dados, como a *ScienceDirect* e *Scopus*, assim como *websites* institucionais e *Grey and White documents*. Para auxiliar na referenciação bibliográfica, recorreu-se ao *Mendeley Desktop*, adotando o estilo *Harvard Referencing*.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação divide-se em sete capítulos, conforme se apresenta de seguida:

1. **Introdução:** neste capítulo é apresentada a contextualização do tema, a definição de objetivos, a apresentação da metodologia e a estrutura da dissertação.
2. **Setor Eólico:** neste capítulo são contextualizadas as Energias Renováveis e é apresentada uma breve caracterização do setor eólico, com maior foco em Portugal.
3. **Economia Circular:** neste capítulo apresentam-se os conceitos de sustentabilidade e Economia Circular, tendo maior foco na segunda e procurara-se analisar a sua evolução e o papel dos resíduos e da sua gestão na mesma.
4. **Reciclagem de Materiais Compósitos:** neste capítulo são apresentadas as características dos materiais compósitos e os métodos existentes para a sua reciclagem, assim como alguma literatura que retrata reciclagem de laminados de fibra provenientes de aerogeradores.
5. **Problemática das Pás de Rotor dos Aerogeradores Eólicos no Fim de Ciclo de Vida:** neste capítulo apresenta-se uma breve descrição dos componentes e materiais de um aerogerador e dos resíduos resultantes quando atingem o fim do seu ciclo de vida.
6. **Caso Prático:** neste capítulo são apresentados os procedimentos adotados, uma breve referência aos materiais e equipamentos e é feita a análise e discussão dos resultados obtidos.
7. **Conclusões:** neste capítulo são apresentadas as conclusões do estudo efetuado, assim como as limitações ao seu desenvolvimento, e propostas de trabalho futuros.

Capítulo 2

Setor Eólico

Neste capítulo é apresentada uma breve contextualização sobre a importância das energias renováveis para um desenvolvimento sustentável, dando especial enfoque ao setor eólico.

2.1 As Energias Renováveis

A crescente preocupação com o aquecimento global e o impacto da vida humana no planeta tem levado a que diversos países procurem estabelecer estratégias e planos que visem, por exemplo, a diminuição das emissões de carbono.

As metas impostas pelo Acordo de Paris, em 2015, baseiam-se numa mudança drástica nos hábitos e legislação de todos os países envolvidos para que o aquecimento global médio não ultrapasse os 1,5°C. A estratégia a longo prazo da União Europeia (UE) passa por implementar ações que visem principalmente a neutralidade carbónica no futuro (República Portuguesa - Ambiente e Transição Energética, 2019).

É possível observar na Figura 1, que os planos para cumprimento destas metas passam cada vez mais pelo investimento em mudanças de hábitos energéticos e na difusão da presença de infraestruturas de baixo carbono (LCI), sendo que a sua utilização tem sido cada vez mais notória e tem vindo a crescer exponencialmente (Jensen, Purnell & Velenturf, 2020).

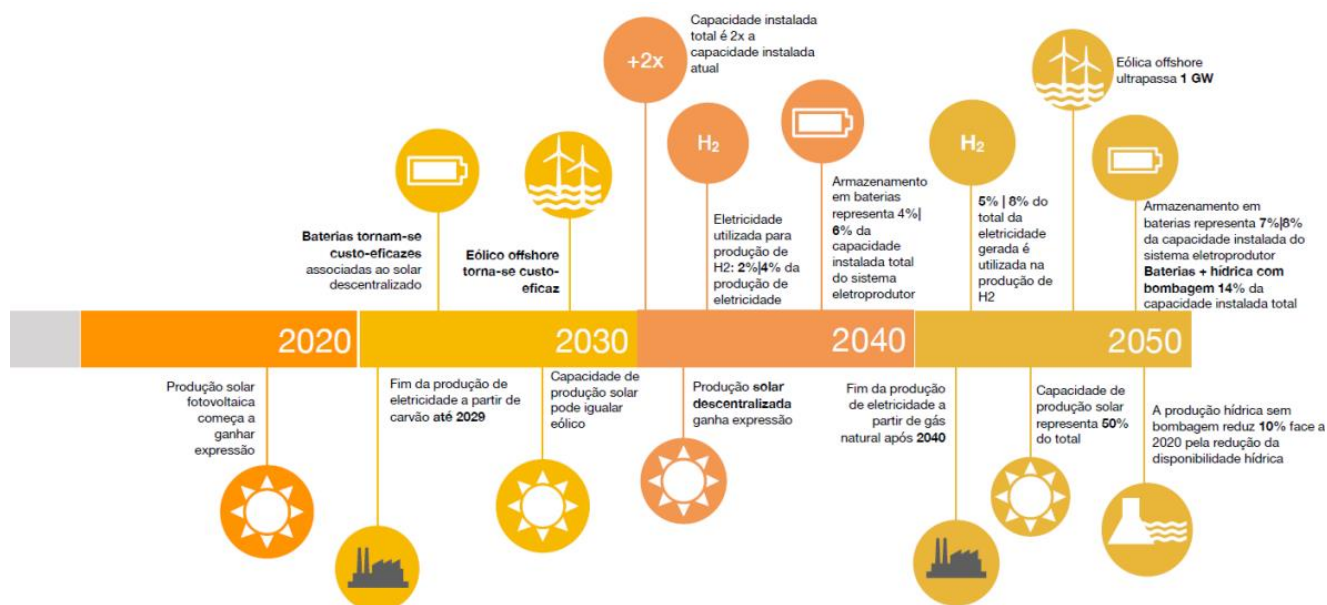


Figura 1 – Plano para o alcance da neutralidade carbónica até 2050 (República Portuguesa - Ambiente e Transição Energética, 2019).

Estas infraestruturas podem ser definidas como sendo estruturas ou componentes de qualquer sistema que esteja presente no processo de produção, armazenamento e transporte de energia proveniente de fontes de energia renovável (FER) ou que as utilizem, sendo as mais conhecidas os painéis fotovoltaicos, as turbinas eólicas e, por exemplo, os meios de transporte elétricos (Jensen, Purnell & Velenturf, 2020).

Esta crescente adoção de LCI como ferramenta para a descarbonização é também reflexo de uma mudança no setor energético e do aumento da utilização de FER. As FER são fontes de energia renováveis, ou seja, que se apresentam como um recurso infinito e que não esgota, podendo ser utilizados indefinidamente (Hersh, 2006).

Atualmente, o mercado das energias ainda é altamente dominado por combustíveis fósseis, como o petróleo, o gás natural ou o carvão. Os combustíveis fósseis são fontes de energia não renováveis, ou seja, são recursos finitos que não poderão ser utilizados indefinidamente e que apresentam consequências negativas no meio ambiente (Davidsson et al., 2014).

Segundo a Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), no ano de 2020, em Portugal cerca de 26% da energia final consumida representava energia elétrica, sendo a segunda maior “fatia”, apenas precedida pelo petróleo que representa cerca de 44% do consumo final de energia (DGEG, 2021b). Se for considerado, não o modo de consumo energético, mas sim a sua fonte, o petróleo apenas representa 43%, sendo procedido pelas FER, que representam 32% (DGEG, 2022). Na Figura 2 é possível observar a variação da contribuição das FER nos últimos anos em Portugal.

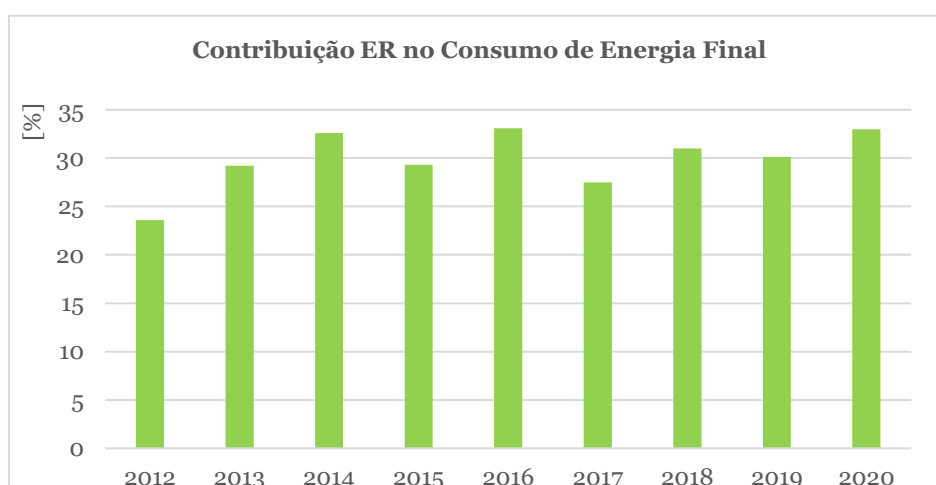


Figura 2 – Contribuição das FER no consumo de Energia Final ao longo dos anos em Portugal (DGEG, 2022).

Para melhor compreender de que modo o mercado da energia se comporta e como é dependente das energias não renováveis, é preciso ter em consideração a diferença entre os conceitos de consumo de energia primária e consumo final. Segundo o Balanço Energético Nacional da DGEG, energia primária entende-se como toda a energia que é diretamente utilizada ou transformada, enquanto por consumo final se entende a energia que efetivamente é consumida, não contabilizando os consumos do setor energético e matéria-prima, assim como a utilização para transformação (DGEG, 2021a). Assim, é compreensível que, por exemplo, a eletricidade apresente uma maior fatia de consumo final face ao primário visto que muitas das fontes não renováveis ainda são utilizadas no setor energético para produção de eletricidade que depois chega ao consumidor final.

Sendo que a transição para uma maior dependência de FER, enquanto energia primária, mas também consumo final, é cada vez mais inevitável, estudos indicam que as fontes dominantes serão a energia fotovoltaica, a eólica e a hídrica (Moriarty & Honnery, 2021).

Em Portugal, no ano de 2020, o setor eólico representava a 3ª maior fatia energética, sendo apenas precedido pela energia hídrica, proveniente de barragens ou das ondas, e pela biomassa, como pode ser observado na Figura 3 (DGEG, 2022).

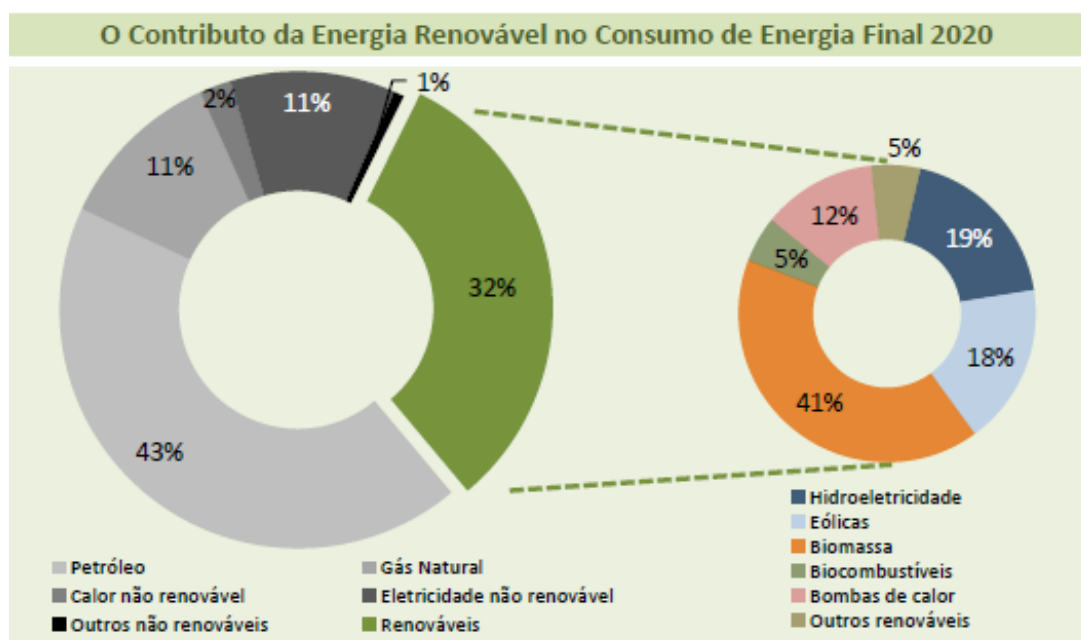


Figura 3 – Contributo das FER no Consumo de Energia Final em 2020 (DGEG, 2022).

Segundo a base de dados de fontes renováveis de energia portuguesa, em maio de 2022, cerca de 40% da potência renovável instalada em Portugal correspondia a energia eólica (5 598.48 MW), sendo apenas precedida pela energia hídrica, confirmando os dados

apresentados da figura anterior (DGEG, 2021c). Na Figura 4 é então possível observar a distribuição da potência instalada a nível nacional por tipo de fonte, como por exemplo, biogás, fotovoltaica, Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) ou Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH), sendo que o setor eólico será caracterizado com mais pormenor na secção seguinte.

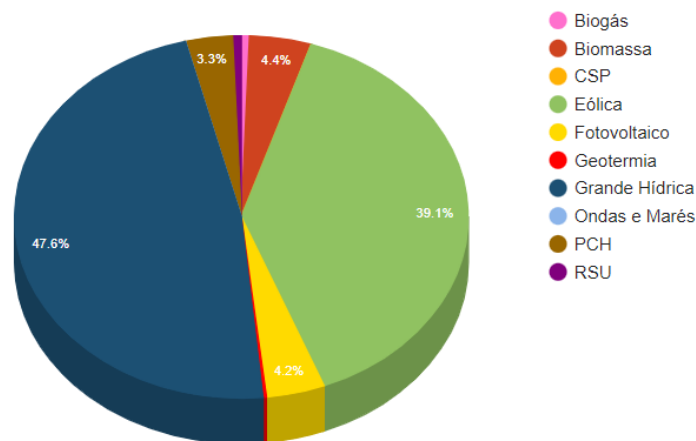


Figura 4 - Distribuição da potência instalada renovável em Portugal em maio de 2022 (INEGI, 2022a).

Atualmente em Portugal, com o objetivo de atingir a neutralidade carbónica até 2050, têm sido aplicadas as diretrizes definidas pelo Governo que se focam maioritariamente na redução dos gases de efeito de estufa e na aplicação de energias renováveis e políticas energéticas mais conscientes, sendo que o maior foco reside nas fontes energéticas, tendo havido um crescente investimento no setor eólico, que é visível a nível global (República Portuguesa – Ambiente e Transição Energética, 2019).

2.2 Caracterização do Setor Eólico

Ainda que a pandemia tenha tido impactes negativos em diversas áreas, no mercado energético foi possível observar um crescimento no setor eólico a nível global, reflexo da resiliência. O ano de 2021 foi o segundo melhor de sempre no que toca à produção de energia eólica, sendo apenas antecedido pelo ano de 2020 que apresentava mais 1,8% de crescimento (Lee & Zhao, 2022).

Um estudo da *Global Wind Energy Council* previa um crescimento estimado de 4% anual nos próximos 5 anos a nível global, potenciado por políticas mais verdes e de incentivo à sustentabilidade que prezam pela transformação das fontes de energia utilizadas (Lee & Zhao, 2021). No entanto, com o crescimento registado nos últimos 2 anos, estudos indicam que até 2026 haverá um incremento do mercado da energia eólica pode ir até aos 6,6% (Lee & Zhao, 2022).

Como parte do compromisso assumido aquando do Acordo de Paris e do seu papel para o desenvolvimento sustentável, que será abordado no capítulo seguinte, Portugal focou os seus esforços no setor eólico, tendo já investido em diversas estruturas *onshore* e *offshore*. Os parques *onshore* são, até aos dias de hoje, os mais comuns e são instalados em terra, em zonas ventosas. Os parques *offshore* são instalados na costa do país e têm apresentado um grande crescimento, sendo que se prevê que estes atinjam uma potência instalada de 1 GW até 2050 em Portugal (República Portuguesa – Ambiente e Transição Energética, 2019).

2.2.1 Setor Eólico em Portugal

Ainda que, face aos valores associados às fontes não renováveis, os valores das FER apresentados na secção anterior pareçam quase insignificativos, Portugal é o 11º país europeu que apresenta a maior potência instalada de energia eólica (WindEurope Business Intelligence et al., 2022).

A primeira instalação de um parque eólico em Portugal data de 1991, em Pico da Urze, na Região Autónoma dos Açores, com uma potência instalada de 1,8 MW e ainda hoje está em funcionamento (INEGI, 2022b).

Desde 1991 surgiram mais 262 instalações eólicas espalhadas por Portugal Continental e pelas regiões autónomas sendo que destas 263, apenas 258 se encontram em funcionamento e 5 já se encontram desativadas. A maior concentração de parques encontra-se nas zonas Centro e Norte, com 107 e 101 parques, respetivamente. Os restantes 55 encontram-se distribuídos pelas zonas de Lisboa, Alentejo, Algarve e Ilhas (DGEG, 2022). Com uma potência instalada, em 2022, de 2.745 MW, a região centro sozinha representa cerca de 50% da produção eólica nacional, sendo que, considerando também a potência da zona norte, 2.235 MW, perfazem estas cerca de 87% da produção nacional (DGEG, 2022).

Na Figura 5 é possível observar a distribuição geográfica dos 263 parques construídos até hoje, sendo importante destacar que nos últimos anos tem-se investido nos parques eólicos *off-shore*, que se prevê que sejam o futuro da energia eólica.

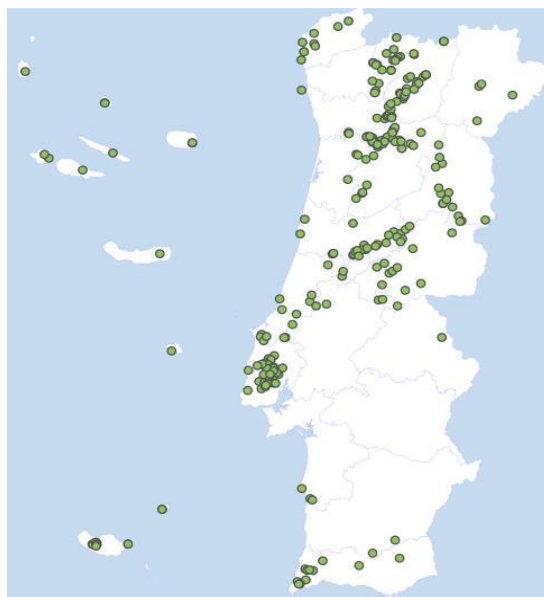


Figura 5 – Distribuição dos parques eólicos em Portugal (INEGI, 2022b).

Entre 2008 e 2020, observou-se um crescimento de 70 a 80% da potência instalada de energia eólica (DGEG, 2021c). No gráfico da Figura 6 é possível observar que no mesmo período, o crescimento das várias regiões de Portugal foi muito acentuado.

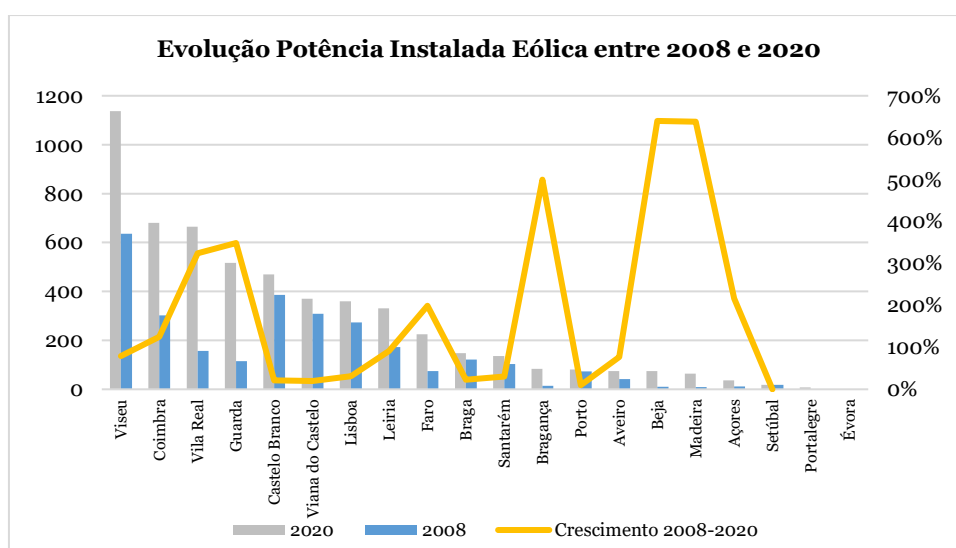


Figura 6 – Evolução da Potência Instalada por Distrito entre 2008 e 2020 Adaptado de (INEGI & APREN, 2020; Rodrigues, 2008).

Mesmo não se encontrando no topo da lista dos países com maior potência instalada, em 2021, Portugal representava a 3ª maior potência no que toca à produção de energia eólica face ao consumo elétrico, ou seja, cerca de 26% da energia produzida para consumo elétrico era produzida por aerogeradores, sendo apenas precedido pela Dinamarca e pela Irlanda, como é possível observar na Figura 7 (WindEurope Business Intelligence et al., 2022)

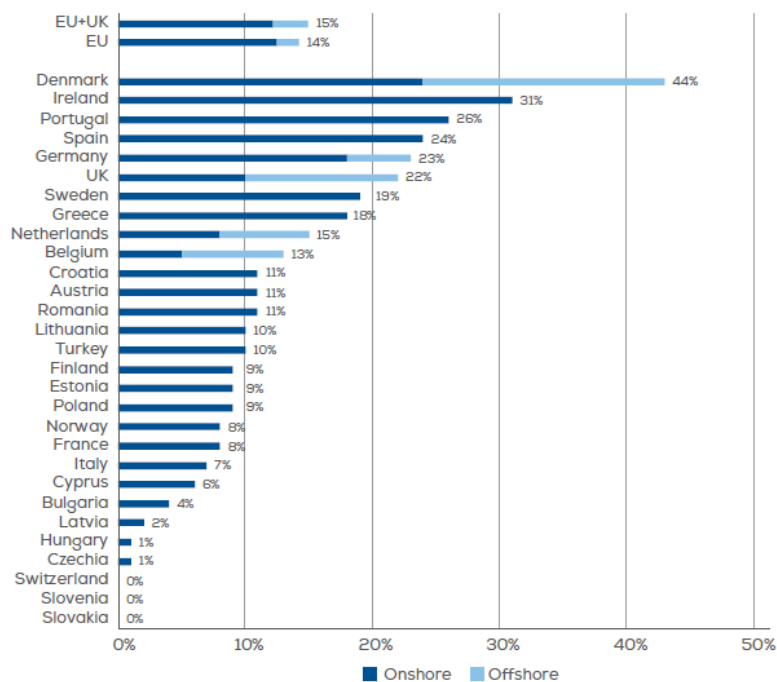


Figura 7 – Percentagem de energia elétrica que provém de energia eólica (WindEurope Business Intelligence et al., 2022).

Ainda que, as energias renováveis e o seu crescimento representem uma necessidade incontornável para a sustentabilidade e para a continuidade da qualidade de vida, é necessário que estas sejam aplicadas em conformidade com uma política circular e sejam devidamente geridas no final do seu ciclo de vida para cumprirem o objetivo de descarbonização.

O paradigma da Economia Circular surge muitas vezes como solução para diversos problemas ambientais pois representa uma ferramenta de melhoria para a sustentabilidade, através do equilíbrio entre a utilização de energias renováveis e as reutilização e reciclagem de matérias-primas (Esteva et al., 2020).

Capítulo 3

Economia Circular

Neste capítulo são apresentadas as definições de Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável, assim como a de Economia Circular e de que modo esta poderá ser uma ferramenta que auxilie a alcançar um Desenvolvimento Sustentável. São também introduzidas as temáticas da gestão de resíduos e da importância da análise dos ciclos de vida dos produtos.

3.1 Desenvolvimento Sustentável

A Sustentabilidade é comumente designada como capacidade de dar resposta às necessidades do presente, sem comprometer a capacidade de as gerações futuras poderem responder às suas. Este conceito baseia-se em três principais pilares ou dimensões: economia, ambiente e sociedade ou, como são informalmente conhecidos, lucro, planeta e pessoas, ou em inglês, *planet, people and profit*. Pode então dizer-se que a Sustentabilidade é uma abordagem holística que considera os três pilares anteriormente reconhecidos (BCSD Portugal, 2021; Mollenkamp & Brown, 2021).

Existem ainda alguns autores que consideram que a sustentabilidade se pode representar com diversas relações entre as suas dimensões (Ruggerio, 2021; Purvis, Mao & Robinson, 2019), observáveis na Figura 8. A representação pelo Diagrama de Venn traduz-se na sustentabilidade apenas como a interseção das três dimensões, enquanto a ideia da sustentabilidade como um telhado de templo, com as dimensões como pilares as representa como as suas bases (Purvis, Mao & Robinson, 2019). Alguns autores ainda defendem que se podem considerar mais dimensões para além das três principais (Purvis, Mao & Robinson, 2019), como a cultural (Soini & Birkeland, 2014) ou a institucional (Turcu, 2013).

A crescente evolução dos dois conceitos, torna cada vez mais difícil dissociar os conceitos de Sustentabilidade e de Desenvolvimento Sustentável (BCSD Portugal, 2021; Ruggerio, 2021; Purvis, Mao & Robinson, 2019).

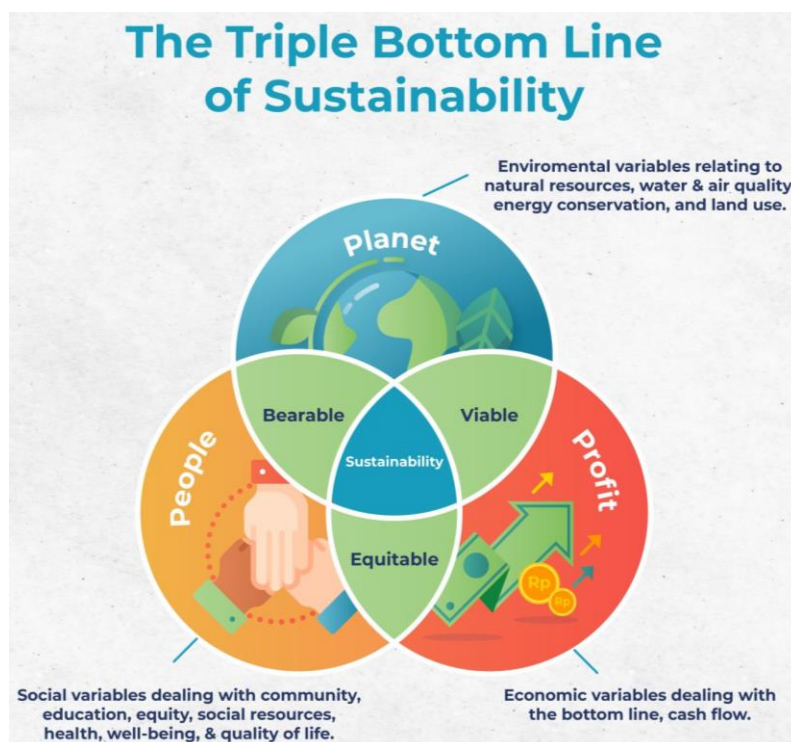


Figura 8 – Três dimensões da Sustentabilidade (Bahraini, 2021).

Em 1987, no Relatório de Brundtland, as Nações Unidas (ONU) definiram o desenvolvimento sustentável como um desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades, garantindo o equilíbrio entre o crescimento económico, o cuidado com o ambiente e o bem-estar social. Este conceito está fortemente interligado com lutas de carácter social, e por isso considerou-se que a luta por um desenvolvimento sustentável também representa uma luta por uma nova era na economia das comunidades, auxiliada por políticas que visem a preservação ambiental (Brundtland, 1987):

Com o passar dos anos, a esfera política, influenciada pela indústria, compreendeu que não se poderia falar de desenvolvimento apenas considerando o desenvolvimento económico de um país, visto que este tinha de estar em consonância com o desenvolvimento ambiental, e que a decadência de um resultaria na decadência do outro. Assim, tem surgido um crescente movimento que visa a inserção da Economia Circular (EC) como resposta à crescente crise climática (ONU, 2022)).

3.1.1 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Inseridos na Agenda 2030 da ONU para o Desenvolvimento Sustentável, dando continuidade ao que já tinha sido alcançado aquando dos Objetivos de Desenvolvimento do

Milénio (2000-2015), os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) surgiram em 2015 (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017).

É possível observar na Figura 9 que os ODS surgem associados às mais diversas temáticas, desde a abolição da fome e pobreza ao crescimento das *Smart Cities*, fazendo também menção à necessidade de a indústria criar estratégias que visem a proteção e desenvolvimento ambientais, assim como um consumo de matérias-primas e mudança para uma EC (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017).



Figura 9 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017).

Segundo a ONU os 17 objetivos podem dividir-se em 5 Ps (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017):

- Pessoas: focados principalmente na erradicação da pobreza e fome e no respeito pela dignidade e igualdade das pessoas (os objetivos 1 a 6);
- Prosperidade: impõem a garantia de que todos possam ter uma vida próspera e de plena realização pessoal, sem descuidar o desenvolvimento económico, social e tecnológico, em harmonia com a natureza (os objetivos 7 a 10);
- Planeta: estes objetivos reforçam a necessidade de proteger o planeta, fazendo uma gestão regrada dos recursos naturais e da implementação de padrões mais sustentáveis no que diz respeito ao consumo e produção. Estes, relativos à resposta à crise climática global (os objetivos 11 a 15).
- Paz: este objetivo salienta a promoção de sociedades pacíficas, justas e inclusivas, sem violência e relembram que o desenvolvimento sustentável não pode ocorrer sem paz (o objetivo 16);
- Parcerias: este objetivo foca-se na mobilização dos meios necessários para a implementação da Agenda 2030, procurando fortalecer o espírito de solidariedade (o objetivo 17).

Pode considerar-se que os ODS, e as suas 169 metas associadas, vieram alterar a forma como as comunidades percecionam o desenvolvimento. Estes integram na sua base as três dimensões do desenvolvimento social, económica, social e ambiental, e assentam em objetivos passíveis de ser aplicados em todos os países, mais ou menos desenvolvidos (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017).

Portugal, enquanto membro ativo deste movimento de mudança, optou por focar a sua ação em 6 objetivos: oferecer uma educação de qualidade (ODS 4), alcançar a igualdade de género (ODS 5), investir na indústria, inovação e infraestruturas (ODS 9), procurar reduzir as desigualdades de oportunidades (ODS 10), combater as alterações climáticas (ODS 13) e proteger a vida marinha (ODS 14) (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017).

Cabe assim às organizações e indústrias, procurar respeitar e tentar implementar os diversos objetivos, podendo focar a sua atenção nos objetivos mais emergentes ao nível do consumo energético e de matérias-primas: o Objetivo 7 – Energias Renováveis e Acessíveis – e o Objetivo 12 – Produção e Consumo Sustentáveis – cujos ícones se encontram ilustrados na Figura 10.



Figura 10 – Ícones dos ODS 7 e ODS 12 (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017)

O ODS 7 passa principalmente por garantir que as fontes de energia são sustentáveis, limpas e acessíveis a todos (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017; ONU, 2015). Para melhor atingir o seu propósito, o ODS 7 tem a si associado um conjunto de 5 metas, que permitem que a sua implementação seja mais bem orientada e acompanhada. Estas passam pela garantia da universalidade do acesso a fontes de energia fiáveis, com o acompanhamento e equipamento tecnológico necessários, assim como pelo aumento do investimento nas FER e na sua eficiência (ONU, 2015)).

Ao nível nacional, este objetivo traduz-se na promoção de Portugal enquanto um fornecedor energético líder ao nível europeu, primando pela transição para uma economia de baixo

carbono, indo de encontro ao crescente investimento nas LCI (Jensen, Purnell & Velenturf, 2020; Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017).

No caso do ODS 12, este tem como principal missão a garantia de padrões de consumo e de produção sustentáveis (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017; ONU, 2015). Assim, como os restantes objetivos já mencionados, o ODS 12 tem definidas algumas metas que permitem uma maior facilidade de adaptação ao objetivo final, neste caso, a garantia de padrões sustentáveis. Estas passam pelo desenvolvimento de uma economia mais circular e colaborativa, focada na desmaterialização e num consumo sustentável, através da conceção de produtos e do seu uso eficiente, assim como da valorização dos recursos existentes. Neste objetivo, é possível identificar uma forte componente industrial, sem nunca descuidar a componente ambiental das metas definidas, procurando muitas vezes a simbiose entre as mesmas que resultam em estratégias de Ecoindústria, que têm vindo a ser cada vez mais adotadas. Muitas destas metas traduzem-se em atividades e ações na comunidade, como o aumento das taxas de recolha, reciclagem e valorização dos resíduos, a promoção de compras ecológicas e sustentáveis, o aumento da participação dos consumidores na tomada de decisão, e acesso à Justiça e fiscalidade verde (European Environment Agency, 2022; Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017; ONU, 2015).

No que diz respeito às ações tomadas pelo Governo português, no âmbito da educação e da consciencialização da população para as problemáticas envolvidas nos ODS, estas dividem-se em três pontos estratégicos: a descarbonização, o desenvolvimento de uma economia circular e colaborativa, e a valorização territorial, definindo assim um grande foco na eficiência energética, na economia e no seu efeito no ambiente. Estes pontos estratégicos são comuns a diversos objetivos, nomeadamente, o ODS 4 que procura também educar a população nas temáticas atuais de extrema relevância para o ODS 12 e para a sua implementação, por responderem a problemas cada vez mais emergentes (Ministério dos Negócios Estrangeiros, 2017).

3.2 Economia Circular

Associada à ideia de que o futuro passa por um desenvolvimento sustentável, surge então muitas vezes o conceito de EC, como é referido no ODS 12. Esta associação deriva do impacto positivo que a introdução da circularidade na economia representa para as vertentes da sustentabilidade, anteriormente mencionadas, assim como da semelhança que é apontada por alguns autores entre os conceitos de desenvolvimento sustentável e a EC (Pacurariu et al., 2021; Walker et al., 2021) .

Os primeiros movimentos de adaptação da economia às necessidades ambientais surgiram na década de 70 do século XX, motivados por três principais fatores: o aumento considerável da poluição, resultado da crescente industrialização das grandes potências industriais, o aumento dos preços do petróleo e derivados, que levou a uma reflexão sobre a dependência dos mesmos, e diversos estudos que surgiram no âmbito da viabilidade dos recursos existentes perante o crescimento da população e dos seus impactos ao nível social, económico e ambiental (Oliveira, 2017). No entanto, a popularização do conceito de Economia Circular só viria a acontecer na década de 90, surgindo como uma alternativa à economia linear (D'Amato et al., 2017).

Na Tabela 1 é possível observar uma análise comparativa dos dois modelos, tendo em conta diversos fatores.

Tabela 1 – Análise comparativa dos modelos de Economia Circular e Linear Adaptado de (Gureva & Deviatkova, 2020).

Fator De Comparação	Economia Linear	Economia Circular
Consumidor	Apenas considera os seus próprios benefícios	Age como parte integrante da sociedade e natureza
Nível De Produção	Aumento da taxa de produção a todos os níveis, ocorrendo uma saturação no mercado e possível crise de superprodução	Produção em ciclo fechado, procurando minimizar a quantidade de produtos, sendo estes de melhor qualidade e mais recicláveis
Nível De Consumo	Comportamento de superconsumidores, com desejo excessivo por bens	Desenvolvimento de novos padrões de consumo, acompanhando a necessidade e não o desejo dos consumidores
Utilização De Recursos	Extração e utilização de recursos naturais não considerando o impacto ambiental	Interação de diversos recursos não tangíveis de modo a produzir e usar bens com materiais reciclados por base
Resíduos	Constante crescimento dos resíduos resultantes	Redução gradual dos resíduos
Ciclo De Vida Dos Produtos	Ciclo de vida curto devido à rápida deterioração ou obsolescência programada	Ciclo de vida prolongado, prezando sempre pela reutilização e reciclagem
Principal Objetivo	Maximizar o lucro sem ter em conta o equilíbrio do crescimento económico	Alcançar um equilíbrio verde, suportado por um crescimento económico

As economias circular e linear podem-se caracterizar como sendo regenerativa e degenerativa, respetivamente. Estes conceitos aparecem muitas vezes associados à ideia de que uma economia circular se assemelha bastante a uma bioeconomia, ou seja, uma

economia que tem por base um modelo que defende um melhor aproveitamento dos recursos e da sua reutilização, aliados a uma ideia de regeneração dos ciclos dos materiais, promovendo a sua reinserção como matéria-prima. A associação entre a EC e a bioeconomia, ou Economia Verde, nem sempre é consensual visto que a principal diferença entre estas reside na presença política, que é bastante mais relevante no caso da Economia Verde e, dependendo do autor, esta pode ter um peso maior ou menor na definição do conceito de EC (Pacurariu et al., 2021; Oliveira, 2017).

No caso da economia linear, esta está fortemente associada ao conceito degenerativo pois considera-se que a abordagem que este modelo defende de produção, utilização e descarte dos resíduos conduz a uma degeneração do ciclo natural na natureza (Pacurariu et al., 2021; Homrich et al., 2018).

Ainda que, a transição para uma economia mais circular seja inevitável, esta requer um conjunto de mudanças. Estas mudanças têm de ocorrer a três níveis: micro, no caso dos recursos e produtos, meso, no caso dos fornecedores e cadeias de valor, e macro, no caso da economia no geral e dos ecossistemas (Pacurariu et al., 2021).

Um estudo de Homrich et al. (2018) procurou, através de uma revisão sistemática da literatura, encontrar a definição que melhor se adequasse ao conceito de EC. Através de uma análise criteriosa a 327 artigos, recolheram diferentes definições, sendo possível observar na Tabela 2 aquelas que mais se destacaram pela semelhança ao conceito, que geralmente lhe é associado.

Tabela 2 – Principais definições de Economia Circular (Homrich et al., 2018).

Referência	Definição
Wen, Zhao & Liang (2007)	A EC e a Ecoindústria são estratégias para resolver os problemas do desenvolvimento sustentável ao nível dos recursos, ambiente e economia.
Zhang et al. (2009)	A EC pode ser considerada como um caminho para o desenvolvimento sustentável em que ocorre uma simbiose eco-industrial nos parques industriais.
Hu et al. (2011)	A EC foca-se numa produtividade baseada nos recursos disponíveis e em melhorias eco-eficientes, especialmente numa ótica de otimização de estruturas industriais e no investimento no desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias, equipamentos e estratégias de gestão.
Su et al. (2013)	Estes autores apresentam duas definições: <ul style="list-style-type: none"> • A EC é uma estratégia de desenvolvimento sustentável que melhora a eficiência do uso de materiais e energia.

	<ul style="list-style-type: none"> • A EC pode ser definida com um tipo de economia de ciclo fechado para o fluxo de materiais, contrariamente à abordagem tradicional de uma economia de final aberto.
Jiao & Boons (2014)	A EC foi definida como um conceito holístico que abrange as atividades de redução, reutilização e reciclagem nos processos de produção, distribuição e consumo.
Hepler (2015)	É uma forma mais ambiciosa e mais <i>marketing-friendly</i> de repensar o modo como os produtos e as suas embalagens podem ser reinseridas novamente nas cadeias de abastecimento.
Tukker (2015)	A EC baseia-se numa filosofia “ <i>win-win</i> ” que defende que uma economia próspera pode coexistir com um meio ambiente cuidado.

Através da análise aos diversos conceitos encontrados, os autores consideraram que a definição que melhor se adequa à Economia Circular é que é uma estratégia emergente, contrária ao sistema tradicional (linear), e que procura combater o problema da escassez de recursos e descarte de resíduos, procurando uma situação benéfica para todos numa perspetiva económica e de valor (Homrich et al., 2018). No entanto, a definição mais comumente associada à EC é a adotada pela Fundação Ellen MacArthur, que a define como sendo um modelo que vem solucionar desafios globais como as alterações climáticas, perdas de biodiversidade, desperdício e poluição (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

No âmbito da adoção de estratégias mais verdes e ecológicas, procurou-se definir indicadores e *frameworks* que permitam quantificar a circularidade associada a processos e produtos, sendo que a Comissão Europeia definiu alguns no âmbito do Plano de Ação para a Economia Circular. Este plano foi inicialmente desenvolvido em 2015, sendo que apenas em 2018 surgiram diplomas legais no âmbito da gestão dos resíduos neste contexto (Serviço das Publicações da União Europeia, 2021).

Fruto deste interesse por parte da Comissão Europeia, que levou à publicação de diversos planos e regulamentos, surgiram então um conjunto de indicadores que esta considera que monitorizam o envolvimento dos países nestas iniciativas. Estes indicadores apresentam diversas temáticas e categorias, como a produção e consumo, que contempla a geração de diferentes resíduos, ou a competitividade e inovação, que contempla, por exemplo, os investimentos efetuados na área da EC e o número de pessoas diretamente empregadas na área (Eurostat, 2022).

Um dos indicadores que mais se destaca é o da taxa de matérias que são fruto de uma atividade circular e que resultam de processos de reciclagem, inserido na categoria de

matérias-primas secundárias ¹. Este traduz a utilização global de material reciclado que volta a ser utilizado, substituindo a matéria-prima virgem (Eurostat, 2022).

Ainda que este valor tenha vindo a aumentar significativamente nos últimos anos, no ano de 2020, ao nível europeu a taxa referente às matérias secundárias era 12,8%, enquanto em Portugal era somente 2,2% (Eurostat, 2021). Este valor baixo é reflexo das barreiras que estes materiais têm de ultrapassar. Estas devem-se principalmente à falta de confiança que existe neste tipo de materiais, por não haver legislação que regularize os padrões de qualidade, e do entrave que o transporte e o custo associado a ele representam (Bourguignon, 2022).

Assim, como meio para solucionar a baixa taxa de circularidade dos materiais, tanto ao nível nacional como ao nível europeu, a Comissão Europeia definiu algumas metas, sendo que entre elas foi definida a importância do desenvolvimento e normalização de procedimentos e medidas que visem a adoção de modelos de negócio como “produto como um serviço”, que se traduz na conceção de produtos mais sustentáveis, considerando a sua qualidade, durabilidade e impacte durante toda a sua vida útil (Comissão Europeia, 2020).

A importância da conceção de produtos ecológicos, também denominada de conceção ecológica ou *Ecodesign*, já tem vindo a ser incentivada pela União Europeia, sendo que em 2009, com a Diretiva 2009/125/EC, a conceção ecológica passou a ter ainda mais destaque. Esta foi reconhecida como sendo um elemento essencial na criação de estratégias ao nível comunitário para a integração dos produtos, fazendo com que a sua conceção ecológica se traduzisse numa abordagem preventiva e procurasse otimizar os seus impactes ambientais (Parlamento Europeu, 2009).

O *Ecodesign* é cada vez mais uma parte essencial da EC pois, ao focar-se na conceção de produtos, tendo por base materiais e meios mais sustentáveis e procurando primar pela qualidade e inovação do mesmo, garante a diminuição das emissões resultantes e processos de reciclagem mais eficientes. Todas estas características permitem reduzir o impacte dos produtos logo a partir do seu *design* (Iberdrola, 2022a).

¹ São materiais reciclados que podem ser utilizados em processos de manufatura juntamente com ou em vez de matéria-prima virgem (Bourguignon, 2022).

Na Figura 11 é possível observar alguns dos benefícios associados à adoção dos princípios do *Ecodesign*. Estes passam principalmente pelo controlo do impacto ambiental que os produtos representam, procurando diminuir as emissões associadas a estas e aumentar a eficiência da sua produção, mas também pela melhoria da qualidade destes com vista à sua durabilidade e versatilidade. Para as indústrias em si, a adoção destas estratégias traduz-se numa clara diferenciação ao nível do mercado em que estas operam, tornando as também mais sustentáveis e fazendo com que estas primem pela inovação no que diz respeito à sustentabilidade dos seus produtos. Além desta diferenciação ao nível competitivo, estas também apresentam benefícios ao nível da atração e satisfação de clientes (Iberdrola, 2022a).



Figura 11 – Principais benefícios do *Ecodesign* (Iberdrola, 2022a).

A conceção destes produtos sustentáveis, alinhada com uma estratégia de EC, baseia-se em novas abordagens ao próprio processo de manufatura e do propósito dos mesmos, colocando a responsabilidade pelo impacto do produto no próprio produtor, mesmo durante a utilização por parte dos consumidores.

Ao alargar a responsabilidade do produtor a jusante da cadeia de valor, ou seja, ao garantir que o produtor é responsável pela manutenção e possível reciclagem dos produtos, tornou-

se cada vez mais recorrente a adoção de estratégias focadas num *design* também ele mais responsável (Korniejenko et al., 2021; Jensen & Skelton, 2018).

Na Figura 12 é possível observar os vários estágios que devem ser tidos em consideração aquando do *design* do produto em questão. O exemplo apresentado é o de um aerogerador, cuja fase de reciclagem e reaproveitamento do material que o constitui serão abordados nas secções referentes à reciclagem de materiais compósitos e à problemática do final de vida dos aerogeradores.

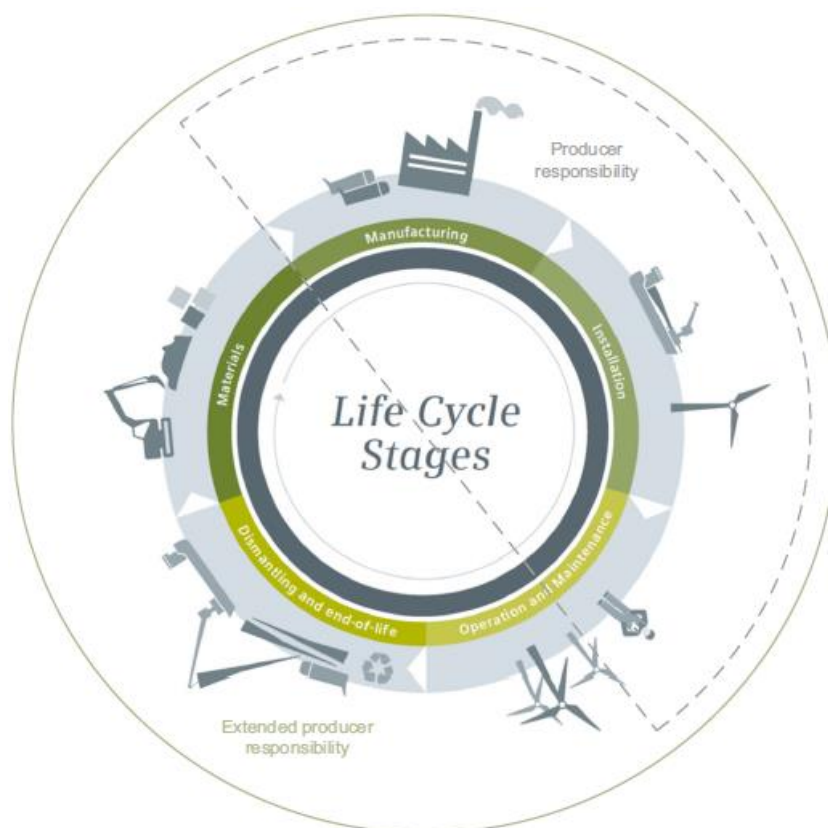


Figura 12 – Ciclo de vida de produtos do ponto de vista da responsabilidade do produtor (Jensen & Skelton, 2018).

Esta ideia de que o processo de conceção dos produtos deve ter em consideração todo o seu ciclo de vida útil está extremamente enraizada na crescente tendência de adoção dos princípios da Ecoindústria e do *Ecodesign*, visto que toda a poluição e todos os custos associados ao produto podem ser previstos aquando da sua conceção (Iberdrola, 2022a; Bahraini, 2021; Homrich et al., 2018; Parlamento Europeu, 2009). Esta crescente adoção de estratégias mais focadas no produto tem levado ao desenvolvimento de ferramentas e práticas, como por exemplo o *cradle-to-cradle* (C2C) que, atualmente, é uma das principais ferramentas do *Ecodesign* (Homrich et al., 2018; Ellen MacArthur Foundation, 2017).

O C2C é um modelo que se baseia num design regenerativo e que imita a natureza, ou seja, na ideia de que os materiais, produtos e serviços devem ser desenhados de modo a que no fim do seu ciclo de vida possam ser reutilizados como materiais de elevada qualidade, indo de encontro aos princípios que o *Ecodesign* defende (Construcía, 2022; Iberdrola, 2022a; Homrich et al., 2018).

Também muito associada à crescente tendência da eco-indústria, surge cada vez mais a necessidade e adoção de estratégias de análise de ciclo de vida (ACV), que, pela sua análise aos impactes ambientais, está estreitamente relacionada com a C2C e com a adoção do *ecodesign*. No entanto, enquanto o C2C procura aumentar o impacte positivo associado aos produtos, a ACV procura diminuir o impacte negativo que estes causam (Bjørn & Hauschild, 2018).

Segundo a ISO, pode definir-se ciclo de vida como sendo um conjunto de estágios consecutivos e interligados de um produto, desde a geração ou aquisição da matéria-prima que o constitui até ao seu descarte final e a sua análise como sendo uma compilação e avaliação de *inputs*, *outputs* e impacte ambiental associados ao produto (ISO, 2008).

Esta estratégia permite identificar os diversos tipos de impactes que os produtos e os serviços representam no meio ambiente, sendo uma componente com cada vez mais destaque, visto que a sustentabilidade está cada vez mais focada na redução dos impactes e nos ciclos de vida dos produtos (Mulvaney et al., 2021).

Uma ferramenta que surge sempre associada à EC e que também utiliza como recurso a AVC, também conhecida como sendo um diagrama de um sistema de EC, é o diagrama borboleta. Este diagrama traduz o fluxo de materiais, através da análise da vida dos produtos como sendo um ciclo que se encerra sobre ele próprio, procurando assim diminuir as perdas de materiais (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

O diagrama está dividido em dois ciclos diferentes e baseia-se em 3 princípios fundamentais: a preservação do capital natural, a otimização do rendimento dos recursos e da sua utilização, e o estímulo da efetividade de todo o sistema, procurando acelerar a circularidade de todo os processos e produtos (Silva, 2019; Ellen MacArthur Foundation, 2017). Na Figura 13 é possível observar os princípios e ambos os ciclos: o ciclo biológico e o ciclo técnico.

O ciclo biológico, à esquerda na Figura 13, diz respeito aos materiais consumidos e que através da sua degradação podem retornar de modo seguro à terra, como por exemplo a madeira ou o algodão. À direita, o ciclo técnico, por oposição, representa os produtos que ao invés de serem consumidos como matéria-prima já são um produto final e apresentam a possibilidade de serem reutilizados ou reciclados (Ellen MacArthur Foundation, 2022).

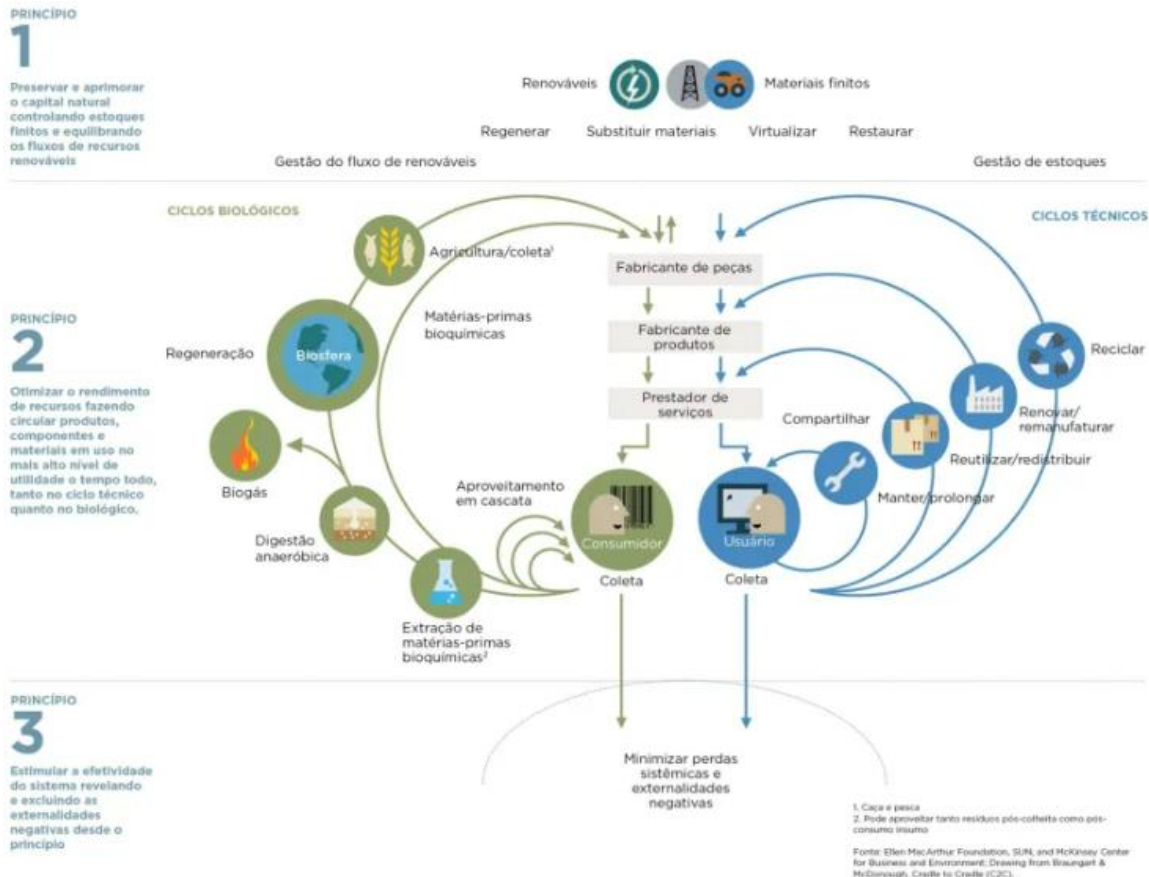


Figura 13 – Exemplo de Diagrama de Borboleta da EC (Silva, 2019).

Um bom exemplo da diversidade destes ciclos são as matérias-primas como a madeira e o algodão que podem estar presentes em ambos. Ainda que numa primeira abordagem estes sejam considerados no ciclo biológico, estes são mais comumente encontrados no âmbito do ciclo técnico, como produtos que são reutilizados, reparados e reciclados, e, apenas quando atingem o final deste ciclo, iniciam o seu percurso no ciclo biológico para serem utilizados para regeneração natural do biosistema, retornando como capital natural através da sua decomposição (Silva, 2019; Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Enquanto o objetivo do ciclo biológico é a degradação dos resíduos resultantes dos produtos e a sua reutilização enquanto nutrientes, o ciclo técnico foca a sua ação na gestão dos

resíduos, procurando que estes obedecem à sua hierarquia antes de serem eliminados ou colocados em aterro (Silva, 2019; Ellen MacArthur Foundation, 2017; Schmid et al., 2020).

A Hierarquia dos Resíduos, ilustrada na Figura 14, hierarquiza e prioriza as estratégias de gestão de resíduos, desde o que representa a melhor opção, a prevenção, à que representa a pior, a eliminação dos resíduos por deposição em aterros (Schmid et al., 2020). Entende-se por resíduo qualquer substância ou objeto que o consumidor ou detentor do mesmo se desfaz, ou tem a obrigação ou intenção de o fazer (Presidência do Conselho de Ministros, 2020).

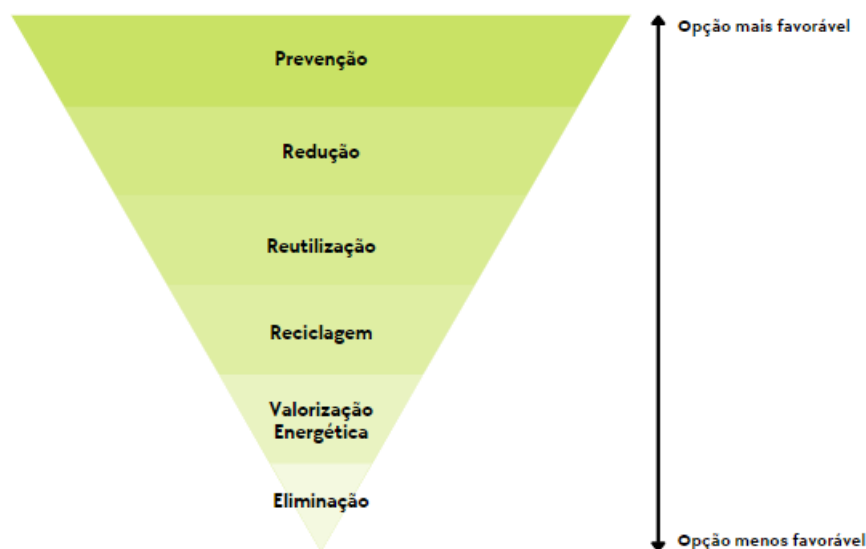


Figura 14 – Hierarquia de Resíduos, adaptado de (Schmid et al., 2020).

Dependendo do autor, ou instituição, e até do resíduo em questão, é possível encontrar diferentes adaptações do conceito desta hierarquia (Schmid et al., 2020; Presidência do Conselho de Ministros, 2020; Jensen, Purnell & Velenturf, 2020), sendo que, por exemplo, no Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro (regime geral da gestão de resíduos, regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e alteração ao regime da gestão de fluxos específicos de resíduos) ao invés dos seis representados na Figura 14, apenas são considerados cinco patamares: prevenção, preparação para reutilização, reciclagem, outros tipos de valorização e por fim a eliminação. Ainda que não contemple a necessidade de redução dos resíduos, este Decreto-Lei define ainda a adoção de práticas que facilitem a reutilização dos produtos, de modo a estender o seu tempo de vida útil (Presidência do Conselho de Ministros, 2020).

Considerando que as pás de rotor dos aerogeradores de 1ª geração têm uma vida útil de cerca de 20 anos, prevê-se que em 2050 já existam cerca de 43 milhões de toneladas deste

tipo de resíduos (Fonte & Xydis, 2021), torna-se cada vez mais imperativa a adoção de estratégias de gestão de resíduos para estas infraestruturas. Esta problemática deve-se principalmente à crescente utilização de FER e a consequente chegada ao fim do ciclo de vida destas, visto que aquando da sua construção, o seu fim de vida não foi tido em consideração, o que se irá traduzir numa grande quantidade de resíduos de compósitos e poluentes (Kalkanis et al., 2019; Naqvi et al., 2018).

Assim, torna-se cada vez mais importante identificar estratégias circulares para a problemática do fim de vida das pás de rotor dos aerogeradores e de outras estruturas de LCI, de modo a ser possível implementar uma gestão correta dos seus resíduos, nomeadamente através de metodologias de reaproveitamento dos materiais compósitos, como por exemplo, a reciclagem destes.

Capítulo 4

Reciclagem de Materiais Compósitos

Neste capítulo é apresentada a definição de materiais compósitos, uma caracterização estrutural dos mesmos, um levantamento dos vários tipos existentes e das suas aplicações práticas. É também apresentada a caracterização das fibras em estudo, a fibra de vidro, e de que modo é que estes materiais podem ser reciclados, assim como alguns exemplos.

4.1 Materiais Compósito

Define-se um compósito como sendo um material que na sua macro composição combina diferentes materiais, resultando num material multifásico que combina as propriedades dos vários que o constituem (Mitchell, 2003; Callister Jr., 1999). De acordo com ASTM D 3878, uma definição de material compósito é dada por:

O material compósito é uma substância que consiste na combinação de dois ou mais materiais de naturezas diferente, a matriz e o reforço, insolúveis um no outro, para formar um material de engenharia avançado que possui propriedades finais superiores às dos seus constituintes (ASTM, 2020).

Ainda que, os compósitos existam na natureza, observando o caso do osso, um compósito formando pela proteína colagénica e substâncias minerais, ou da madeira, que é constituída por fibras de celulose impregnadas de lignina, os primeiros relatos de utilização de materiais desta família datam de 1500 A.C., com a utilização de palha impregnada em lama para a fortificação das habitações. No entanto, o grande impulso na produção e desenvolvimento de compósitos, como são hoje conhecidos, foi durante a 2^a Guerra Mundial. No final do século vinte, a utilização de materiais compósitos já tinha sido alargada a diversas infraestruturas na Ásia e na Europa, sendo que nos anos 90 foi construída a primeira ponte pedonal totalmente constituída por materiais compósitos (Ngo, 2020).

Embora, sejam materiais relativamente caros, em comparação com os mais utilizados na indústria, os compósitos têm tido cada vez mais aplicações em que se destacam pelas propriedades mecânicas associadas ao baixo peso e à facilidade em obter materiais por medida, ou seja, serem produzidos consoante as características que são necessárias, através da manipulação da sua constituição e das quantidades dos diferentes materiais. Atualmente, a sua utilização destaca-se principalmente nas aplicações aeroespaciais, de

transporte, subaquáticas ou, por exemplo, o caso das turbinas eólicas (Soutis, 2020; Ngo, 2020; Callister Jr., 1999).

Um estudo realizado por Bernatas et al. (2021), demonstrou que atualmente a utilização de compósitos está cada vez mais generalizada, sendo que 21% do seu consumo mundial ocorre na Europa. Ao nível da utilização global dos materiais compósitos, pode dizer-se que este está distribuído pelas mais diversas áreas industriais, sendo que os transportes representam a maior percentagem de utilização, como é possível observar na Figura 15.

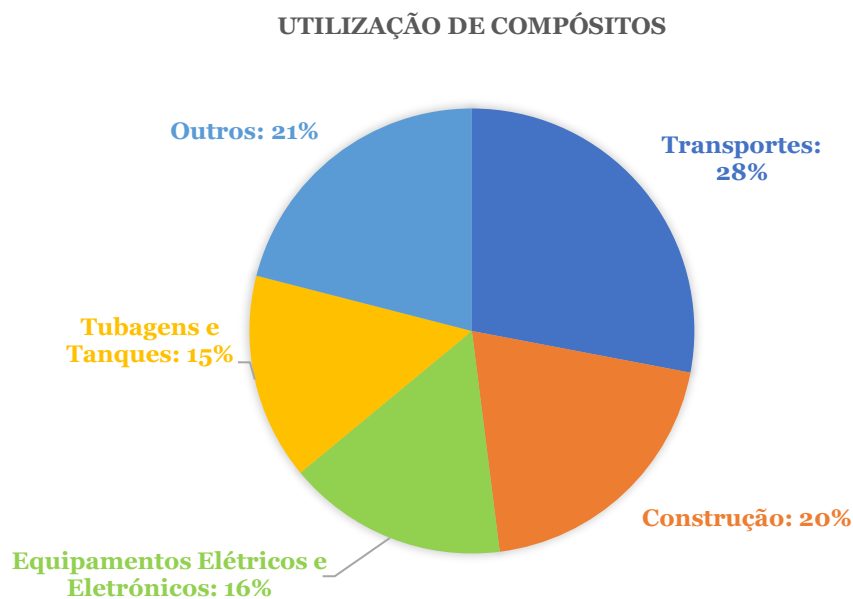


Figura 15 – Distribuição da utilização de materiais compósitos, em volume (Adaptado de Bernatas et al., 2021).

Ainda que na sua essência estes materiais sejam uma combinação de dois ou mais materiais individuais, os seus constituintes são divididos em duas fases: a matriz e o reforço, sendo que Ngo (2020) destaca ainda a *interface* entre estas, não como um constituinte, mas como algo a ter em consideração nas propriedades do material. A *interface* é a zona entre a matriz e o reforço que transmite, por exemplo, as cargas entre as outras duas fases, ainda que esta possa ter uma dimensão à escala atómica e tenha um papel muito importante nas características associadas ao material (Ngo, 2020; Mitchell, 2003).

A matriz tem duas principais funções, suportar as fibras e distribuir as cargas aplicadas pelo reforço, mas também serve para os proteger de fatores externos e conferir resistência à compressão. Um fator muito importante a ter em consideração na escolha da matriz para um determinado reforço e utilização é a sua capacidade de deformação, ou seja, deve ter uma elevada ductilidade, ainda que esta apenas suporte uma proporção muito pequena das

cargas aplicadas, e também deve ter um módulo de elasticidade inferior ao do reforço. Outra das funções da matriz é a redução da propagação de falhas e defeitos nas fibras, pois ao separá-las uma das outras, cria uma barreira à propagação de defeitos, permitindo que a fratura total do compósito só ocorra quando um grande número de fibras falhe (Callister Jr., 1999). Qualquer material pode ser utilizado como matriz, no entanto as mais comuns são as metálicas, as cerâmicas e as poliméricas (Altenbach, Altenbach & Wolfgang, 2018).

Os compósitos de matriz metálica, *Metalic Matrix Composites* (MMC), têm, geralmente uma matriz bastante dúctil e permitem que o compósito seja utilizado a temperaturas mais elevadas, devido às características inerentes aos materiais metálicos. Ainda que os MMC tenham vantagens tanto ao nível da ductilidade do material e inflamabilidade do mesmo, como ao nível da degradação por ação de fluídos orgânicos, estes apresentam um custo muito mais elevado quando comparados com outros materiais e por isso, geralmente, apenas são utilizados em aplicações muito específicas (Callister Jr., 1999).

No entanto, atualmente já é possível encontrar, por exemplo nas indústrias automóvel, aeroespacial ou civil, aplicações de MMC pois requerem um material com boa ductilidade, mas também uma leveza superior ao metal em si. Estes são geralmente matrizes de alumínio, sendo mais comum encontrar associados a fibras de carbono, mas também a fibras de boro, estas últimas especialmente no caso da indústria aeroespacial (SHA et al., 2021; Callister Jr., 1999).

O grande problema associado a este tipo de combinações reside na baixa molhabilidade entre as fibras e a matriz de alumínio durante a produção dos compósitos, o que tem levado à procura de um processo que, por exemplo, através do aumento de temperatura, permita aumentar a molhabilidade sem comprometer os materiais ou levar à formação de compósitos que retirem propriedades ao material (SHA et al., 2021). Também se pode encontrar alguns MMC com matriz de superligas de níquel e cobalto e reforço de fibras de tungsténio, utilizadas em motores (Callister Jr., 1999).

Os compósitos de matriz cerâmica, *Ceramics Matrix Composites* (CMC), são materiais bastante resistentes à oxidação e altas temperaturas, sendo por isso bastante utilizados em motores de elevada eficiência, ainda que tenham uma baixa tenacidade à fratura (Aparicio et al., 2022). Os reforços associados a estes materiais servem, na sua generalidade, o objetivo de melhorar a tenacidade à fratura e o modo de falha associado à fragilidade dos materiais cerâmicos (Callister Jr., 1999). Uma combinação que tem vindo a ser cada vez mais utilizada é a de alumina reforçada com aço inoxidável. A utilização de reforços

metálicos tem vindo a ganhar popularidade quando combinados com matrizes de cerâmica, pois aumenta consideravelmente a rigidez dos materiais, ainda que diminua as temperaturas máximas de funcionamento (Clyne & Hull, 2019).

Os compósitos de matriz polimérica, ou *Polymer Matrix Composites* (PMC), uma resina polimérica reforçada, dividem-se em duas principais categorias: termoendurecíveis e termoplásticos (Callister Jr., 1999). Andrew e Dhakal (2022) ainda consideram que, tendo como critério a biodegradabilidade do material, se pode dividir em 4 categorias: biodegradável de origem natural ou sintética e não biodegradável, onde se incluem os termoplásticos e os termoendurecíveis (Andrew & Dhakal, 2022).

As matrizes termoplásticas são cada vez mais adotadas em aplicações que requerem boas propriedades, estáveis em termos de dimensão e estrutura interna, quando sujeitas a altas temperaturas durante a sua vida útil. Os polímeros termoplásticos mais conhecidos são o poliestireno ou os acrílicos. No caso destes materiais está-se perante um polímero que pode ser aquecido e arrefecido inúmeras vezes, permitindo que, ao atingir a temperatura de fusão, o material seja processado novamente, apenas sofrendo uma pequena degradação ao final de vários ciclos de processamento. O grande benefício da utilização destes materiais reside na sua elevada capacidade de reciclagem (Moura, Morais & Magalhães, 2010; Callister Jr., 1999).

No caso das matrizes termoendurecíveis, ao contrário das termoplásticas, uma vez arrefecido, o material não pode ser alterado. O aquecimento deste material conduz a uma degradação total do mesmo e não à fundição que permite a sua reutilização, e por isso diz-se que este não é reciclável ou reprocessável (Ngo, 2020). Esta dificuldade de reprocessamento ou reciclagem térmica do material representa um grande problema para o ambiente visto que, nos últimos anos, se contabilizou que cerca de dois terços dos materiais compósitos teriam por base matrizes termoendurecíveis (Bernatas et al., 2021).

Este tipo de matriz é a mais utilizada, sendo as mais comuns as resinas epóxi, de poliéster ou de vinilester, que é caracterizada por, antes do seu processamento se encontrar no estado líquido e apenas se solidificar com a utilização de substâncias endurecedoras. Este processo de solidificação é comumente designado como sendo um processo de cura que, consoante as indicações do fabricante quanto ao tempo, pressão ou temperaturas a que devem ser submetidas, podem traduzir-se em diferentes propriedades (Santos et al., 2020; Ngo, 2020; Altenbach, Altenbach & Wolfgang, 2018). O grande benefício associado às resinas termoendurecíveis é que, devido à sua viscosidade pré-cura, a maioria apresenta uma ótima

molhabilidade, o que permite uma boa incorporação das fibras e outros reforços, diminuindo a possibilidade de defeitos associados à *interface* do material (Varma & Gupta, 2018).

As resinas epóxi são as matrizes poliméricas mais utilizadas, principalmente devido às suas propriedades e grande versatilidade (Boogh & Mezzenga, 2018). Apresentam boas características no que diz respeito às propriedades mecânicas, alta resistência específica e rigidez, à resistência química e a solvente, boa resistência ao calor, assim como uma boa adesão e alta molhabilidade face a vários tipos de reforços, ainda que esta apresente um custo quatro a cinco vezes mais elevado do que as outras duas resinas mais utilizadas. O seu baixo peso molecular associado a uma boa resistência térmica e à corrosão, assim como as suas boas propriedades térmicas e mecânicas, tornam a epóxi numa das resinas mais utilizadas (Santos et al., 2020; Altenbach, Altenbach & Wolfgang, 2018; Moura, Morais & Magalhães, 2010). As propriedades associadas à resina utilizada no âmbito desta dissertação para produção de laminados serão discriminadas no capítulo seguinte.

Geralmente, as matrizes poliméricas apresentam custos baixos face às restantes, o seu processo de produção é relativamente simples e possuem boas características mecânicas, ainda que apenas funcionem bem a temperaturas relativamente baixas e em ambientes com humidades controladas (Ngo, 2020; Moura, Morais & Magalhães, 2010).

Enquanto, a matriz providencia maioritariamente a forma, a aparência e a proteção de fatores externos, são os reforços que apresentam as características mecânicas e que suportam as cargas aplicadas (Andrew & Dhakal, 2022).

É importante ter em consideração que os diferentes tipos de matrizes que podem constituir os materiais compósitos influenciam diretamente as propriedades dos seus constituintes, assim como a geometria e a distribuição dos reforços e a natureza da *interface* entre a matriz e o reforço, sendo por isso cada vez mais importante ter em conta a combinação matriz-reforço que melhor se aplica ao propósito do material (Biron, 2013; Callister Jr., 1999).

Os reforços são o constituinte estrutural e são o que define a estrutura interna do material. É a concentração de reforço face à quantidade de matriz que define as propriedades do novo material, assim com a homogeneidade dos mesmos no material (Altenbach, Altenbach & Wolfgang, 2018). Os reforços são, geralmente, fibras, partículas ou os denominados reforços estruturais, sendo que as fibras são os que apresentam a maior importância a nível tecnológico (Callister Jr., 1999).

As diferentes propriedades destes reforços serão caracterizadas na subsecção seguinte, juntamente com a discriminação dos diversos tipos de compósitos que podem surgir através das diferentes combinações matriz-reforço.

4.1.1 Tipos de Compósitos

Como referido anteriormente, os materiais compósitos podem dividir-se em diferentes categorias. A sua classificação pode obedecer a diferentes fatores, consoante o autor, baseando-se, por exemplo, na natureza da matriz ou nas características do reforço utilizado ou também nas propriedades conferidas ao material resultante (Mitchell, 2003). No âmbito desta dissertação utiliza-se a classificação com base nas características dos reforços, ou seja, uma classificação em três famílias: reforçado com partículas, reforçado com fibras ou reforço estrutural, como é possível observar na Figura 16.

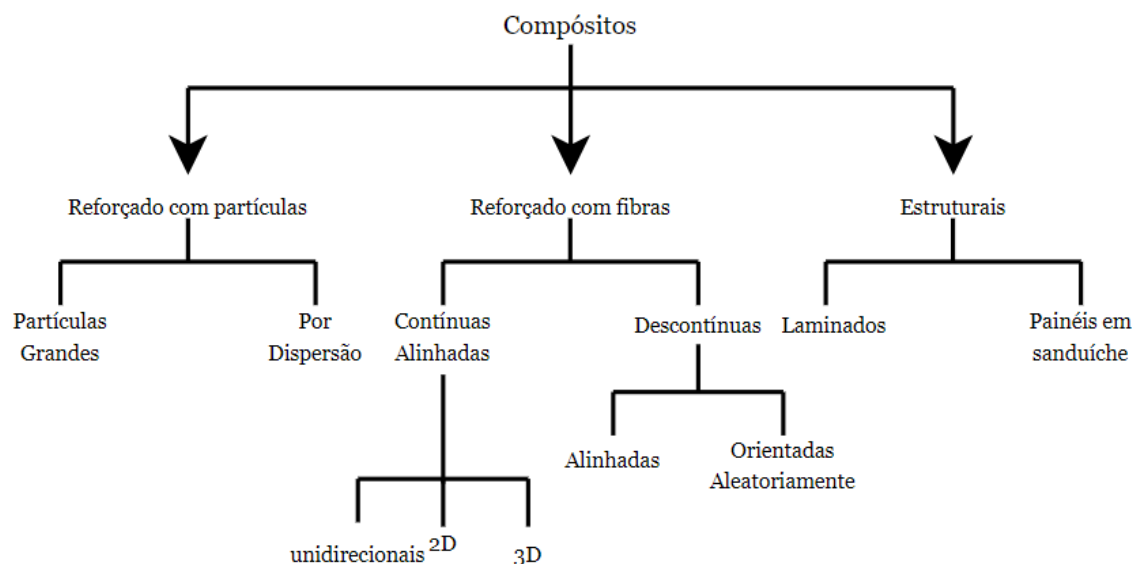


Figura 16 – Diagrama resumo das classificações dos compósitos por tipo de reforço (Altenbach, Altenbach & Wolfgang, 2018; Mitchell, 2003; Callister Jr., 1999).

Os compósitos reforçados com partículas podem dividir-se em reforçados com partículas grandes ou reforçados por dispersão, tendo em conta o tamanho das partículas presentes. A diferença entre os tamanhos dos reforços pode ir, por exemplo, desde fibras contínuas e longas até nanopartículas (Mitchell, 2003).

No que diz respeito, aos compósitos reforçados por dispersão, o princípio é o mesmo que no caso das partículas grandes, mas neste caso são partículas finas, sendo na sua maioria óxidos. Na sua generalidade, estes consistem numa homogeneidade de partículas ao longo do material, em todas as direções, de modo a garantir que as propriedades do material são uniformes. As aplicações mais comuns deste material requerem que a resistência e a dureza

deste sejam aumentadas, o que é conseguido através da utilização de partículas de origem metálica ou não-metálica (Callister Jr., 1999).

Tanto no caso da dispersão como no das partículas grandes, estas podem ter diferentes formas, podendo ser, por exemplo, esféricas ou de geometrias irregulares, sendo que o importante é a sua distribuição, pois esta influencia diretamente as características do material (Altenbach, Altenbach & Wolfgang, 2018).

Com os crescentes avanços tecnológicos, torna-se cada vez mais comum existirem compósitos reforçados com nanopartículas. Os compósitos reforçados com nanopartículas são aqueles cuja fase dispersa apresenta pelo menos uma dimensão inferior a 100nm (Oliveira & Beatrice, 2019). Os compósitos reforçados com partículas são principalmente utilizados na indústria automóvel e na aeroespacial devido à sua resistência específica e rigidez (Ahmadi, Sadighi & Hosseini-Toudeshky, 2022)

Os compósitos estruturais podem dividir-se em compósitos laminares ou painéis em sanduíche (Callister Jr., 1999).

Os compósitos laminares são compostos por camadas de reforço geralmente camadas de fibras contínuas e alinhadas, sendo empilhadas umas sobre as outras, podendo ser, por exemplo, camadas de tecido como fibras naturais, algodão, linho ou fibras sintéticas, fibra de vidro, carbono, boro ou aramida. Dependendo da direção preferencial dos reforços que as camadas possam ter, o material resultante pode apresentar uma elevada resistência em diversas direções, dependendo da solicitação dos mesmos (Callister Jr., 1999). Os laminados distinguem-se principalmente dos painéis sanduíche, no sentido em que os primeiros podem ser constituídos apenas por diferentes fibras, alternadas em direção ou não, enquanto os painéis sanduíche têm obrigatoriamente de ser constituídos por diferentes materiais (Altenbach, Altenbach & Wolfgang, 2018).

Os painéis sanduíche, comumente utilizados na indústria aeroespacial ou naval ou produção de energia como é o caso das pás das turbinas eólica, são um material caracterizado por ter um baixo peso e boas propriedades mecânicas, tais como a resistência ao impacto e a rigidez. Isto deve-se à presença de duas camadas finas, mas rígidas no exterior, com uma camada leve de menor rigidez no meio, como uma sanduíche, em que as camadas exteriores suportam a maior parte das cargas aplicadas e a camada interior tem como propósito resistir às deformações perpendiculares ao plano da fase e resistir a tensões de corte. É comum aplicarem-se camadas exteriores à base de compósitos de fibra de vidro

ou fibra de carbono (FC) e algumas camadas do núcleo em materiais como a cortiça, as espumas, a madeira ou a borracha, entre outras (Anbusagar, Palanikumar & Giridharan, 2015; Callister Jr., 1999).

Os compósitos reforçados com fibras são os que apresentam a maior importância ao nível tecnológico. Uma fibra é uma partícula com um comprimento superior a 100 µm e uma relação entre o comprimento e o diâmetro de pelo menos 10:1, não tendo uma geometria do corte transversal definida, visto que muitas delas não são necessariamente cilíndricas e podem apresentar diversas geometrias (Mitchell, 2003).

Estes compósitos podem então dividir-se consoante o tamanho das fibras. De modo, a distinguir as fibras curtas, ou descontínuas, das longas, ou contínuas, foi definido um comprimento crítico para cada tipo de fibra, dependendo do seu diâmetro e da resistência mecânica e à tensão de corte destas. Se o comprimento da fibra exceder o valor crítico, está-se perante uma fibra contínua, se não está se perante uma fibra descontínua (Callister Jr., 1999).

A utilização de fibras nas matrizes poliméricas procura melhorar propriedades como a rigidez, sendo que o comprimento da fibra, a sua orientação e a forma, assim como as características da fibra em si são fatores preponderantes nas propriedades finais do compósito, ainda que o seu volume face ao final varie apenas entre os 30 e os 70% (Altenbach, Altenbach & Wolfgang, 2018).

Os compósitos reforçados com fibras descontínuas dividem-se então pela sua orientação. Os de orientação aleatória são os que apresentam maior versatilidade no seu processamento visto que o material pode ser submetido a diversos processos de fabrico, pois não existe problema de danificação das fibras em comprimento. Através, por exemplo, da moldagem por injeção, é possível manter grande parte das propriedades associadas à fibra descontínua, como a rigidez. A fibra descontínua com orientação aleatória é comumente designada por manta, também pode ser utilizada em materiais que requeiram um bom acabamento superficial e uma maior resistência química (Such, Ward & Potter, 2014; Moura, Morais & Magalhães, 2010).

No caso das fibras descontínuas alinhadas, estas podem apresentar orientação bidimensional ou tridimensional, dependendo da espessura do material em questão e do seu processo de fabrico, sendo que a orientação destas depende diretamente do tipo de

molde, matriz e deposição das fibras na matriz utilizados no processo de fabrico (Mallick, 2018).

Os materiais compósitos reforçados com fibras descontínuas, ainda que apresentem propriedades bastante inferiores, quando comparados com as fibras contínuas, são muito utilizados na indústria automóvel, por exemplo no caso do painel de instrumentos ou do sistema de ventilação (Mallick, 2018).

No caso das fibras contínuas, estas podem dividir-se consoante as direções em que se encontram alinhadas, sendo unidirecional, bidirecional (2D) ou tridimensional (3D). São comumente designados como tecidos 2D e 3D e consistem numa combinação de feixes longos de fibras, sendo os mais comuns os de vidro, de carbono ou de aramida (Moura, Morais & Magalhães, 2010; Clyne & Hull, 2019).

No caso das mantas unidirecionais, as fibras encontram-se orientadas ao longo de um único eixo ou direção. Esta organização das fibras confere ao material propriedades ideais apenas na direção em que as fibras estão orientadas, ou seja, está-se perante um material anisotrópico. Por anisotropia entende-se a variação das propriedades do material quando medidas em diferentes direções. Quando produzidos ou escolhidos para determinadas aplicações, deve ter-se em consideração em que direção o material irá estar sujeito a maiores solicitações de modo a garantir que é a direção com as melhores propriedades associadas (Clyne & Hull, 2019; Mitchell, 2003; Callister Jr., 1999).

Já no caso dos tecidos bidirecionais, os materiais apresentam isotropia, ou seja, as propriedades são as mesmas em todas as direções (Callister Jr., 1999). Estes tecidos podem apresentar diversos tipos de padrões de organização, conforme ilustrado na Figura 17.

Os tecidos tridimensionais são cada vez mais aplicados no fabrico de materiais compósitos, devido essencialmente, à sua boa resposta mecânica nas diferentes direções das fibras. Estas são obtidas através de processos especiais de tecelagem e ligam múltiplas camadas de fibras com diversas orientações (Moura, Morais & Magalhães, 2010).

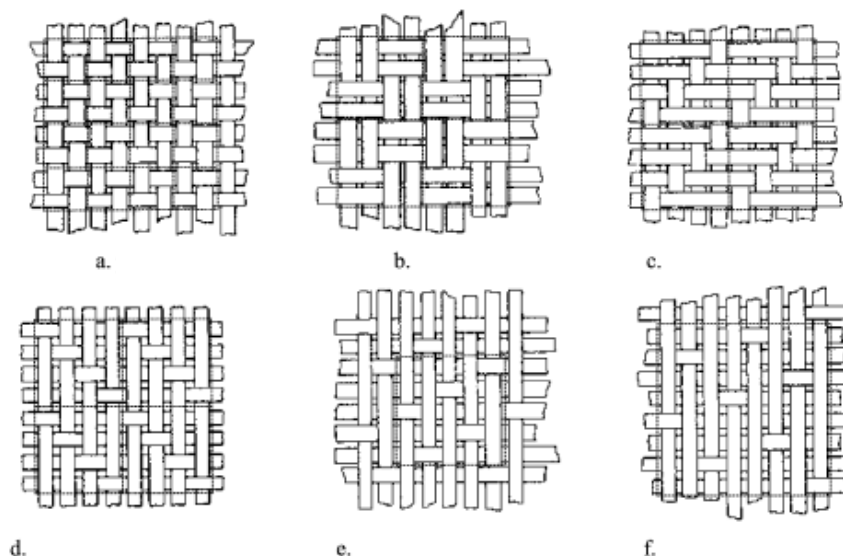


Figura 17 – Diferentes tipos de tecido 2D (Verpoest, 2017).

Na generalidade, os materiais reforçados com fibras, por exemplo de vidro, são empregues quando se está perante uma aplicação que requeira uma grande rigidez associada a uma baixa densidade, assim como uma boa resistência à fadiga e à corrosão (Hagnell & Åkermo, 2019; Bhat et al., 2019).

4.2 Fibra de Vidro

Como referido anteriormente, as fibras são comumente utilizadas quando a aplicação em questão necessita de determinadas características mecânicas, sendo que, atualmente, a Fibra de Vidro (FV) é a mais utilizada, segundo um estudo de 2020 que indica que esta representa 88% das fibras utilizadas, estando os restantes 12% distribuídos entre as fibras naturais e outras sintéticas, como as de aramida, boro ou carbono (Bernatas et al., 2021; Ashby, 2021).

A FV pode ser encontrada no mercado, por exemplo sob a forma de manta, fio, novelo ou *roving*, ou tecidos com diversas direções e organizações, como é possível observar na Figura 18.

A FV é constituída maioritariamente por sílica e óxidos, por exemplo, de cálcio ou ferro, sendo que diferentes composições geram diferentes características mecânicas, químicas e elétricas (Ngo, 2020; Clyne & Hull, 2019; Biron, 2013; Mitchell, 2003).

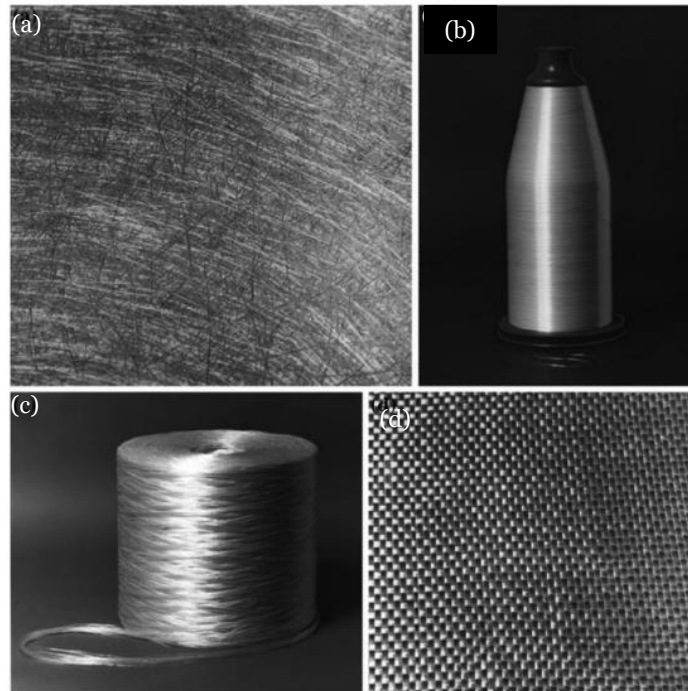


Figura 18 – Fibra de Vidro a) manta de fibra descontínua, b) fio contínuo, c) *roving*, d) tecido (Chawla, 2019).

Na Tabela 3 apresentam-se alguns dos diferentes tipos de FV, assim como a sua densidade, o seu módulo de elasticidade (módulo de Young) e algumas características dominantes destes.

Tabela 3 – Características dos principais tipos de fibra de vidro (Krauklis et al., 2021; Ngo, 2020; Biron, 2013).

Fibra	Densidade [Kg/m ³]	Módulo de Young [GPa]	Características Dominantes
A	2460	72-73	Boas propriedades no que toca à resistência em ambientes alcalinos
C	2460	69-74	Boas propriedades de resistência química, por exemplo, em ambientes corrosivos ou ácidos
D	2140	55	Boas propriedades Dielétricas
E	2550	71-73,5	Boas propriedades de isolamento elétrico
R	2550	86	Boas propriedades mecânicas
S	2550	85-89	

No caso do tipo D, este é utilizado no âmbito de materiais compósitos que estejam expostos a campos eletromagnéticos, como placas de circuitos *high-tech* (Ngo, 2020; Biron, 2013).

A fibra do tipo S surge como uma melhoria face à fibra E, sendo que esta apresenta todas as características da segunda, mas com melhores características quanto à resistência mecânica (*Strength*). A fibra do tipo R é geralmente igual à S, sendo que R é a designação europeia

(Mitchell, 2003). As fibras do tipo S ou R são geralmente utilizadas nas indústrias aeronáutica e espacial, sendo que também já existem algumas aplicações no âmbito desportivo e de lazer e em materiais antibalísticos (Ngo, 2020; Biron, 2013).

As fibras de vidro tipo E têm módulos elásticos relativamente baixos quando comparados com outros reforços. São suscetíveis à fluência e rutura por fluência (tensão) e as condutividades térmica e elétrica das fibras de vidro são baixas, sendo que os seus compósitos de matriz polimérica reforçados são frequentemente usados como isolantes térmicos e elétricos. O coeficiente de expansão térmica das fibras de vidro também é baixo quando comparado com a maioria dos metais (Zweben, 2005).

Devido às suas excelentes características e baixo custo associado, o tipo E representa cerca de 90% das fibras utilizadas em reforços (Mallick, 2018; Biron, 2013). Os Polímeros Reforçados com FV (PRFV) tornaram-se populares na década de 40 do século XX, sendo que apresentam características que os colocam entre os polímeros e os cerâmicos, no que diz respeito à sua resistência mecânica (Ashby, 2021). Na figura 19 é possível observar o nicho onde se inserem os PRFV, ou GFRP em inglês (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), sinalizado com a seta a vermelho.

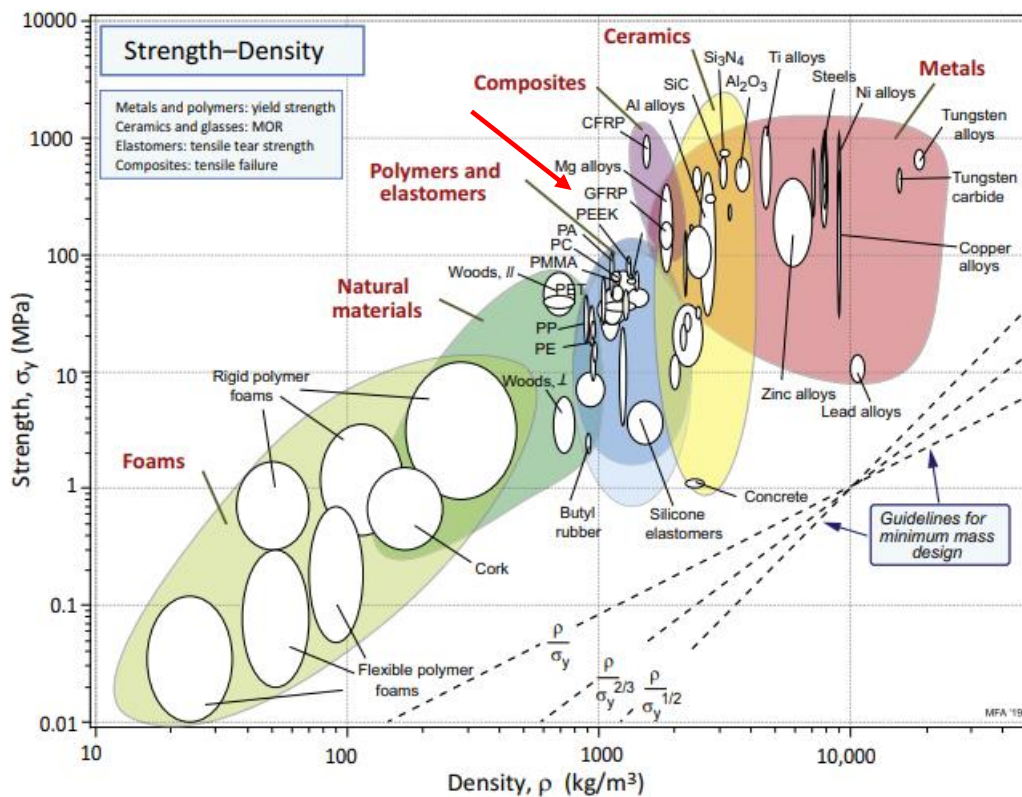
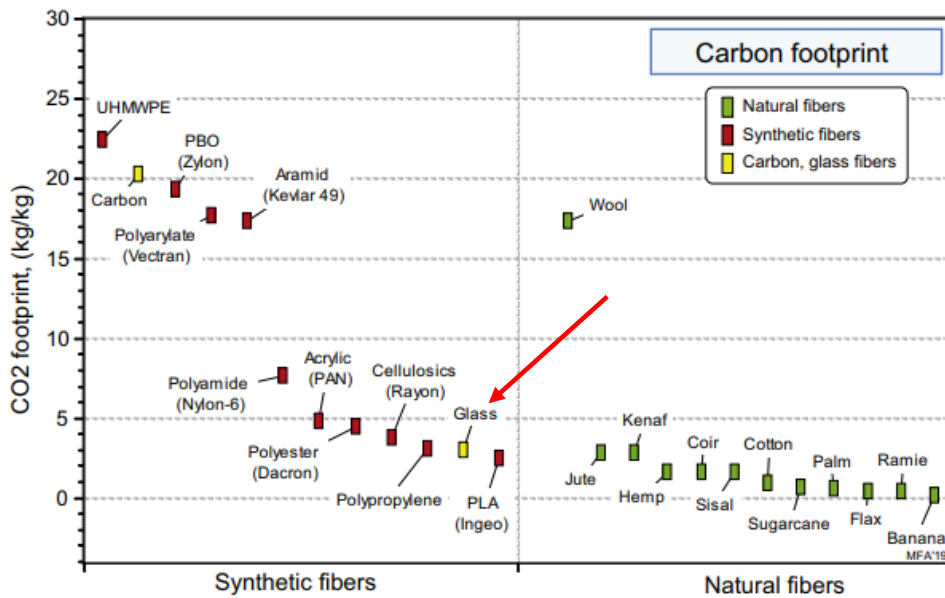
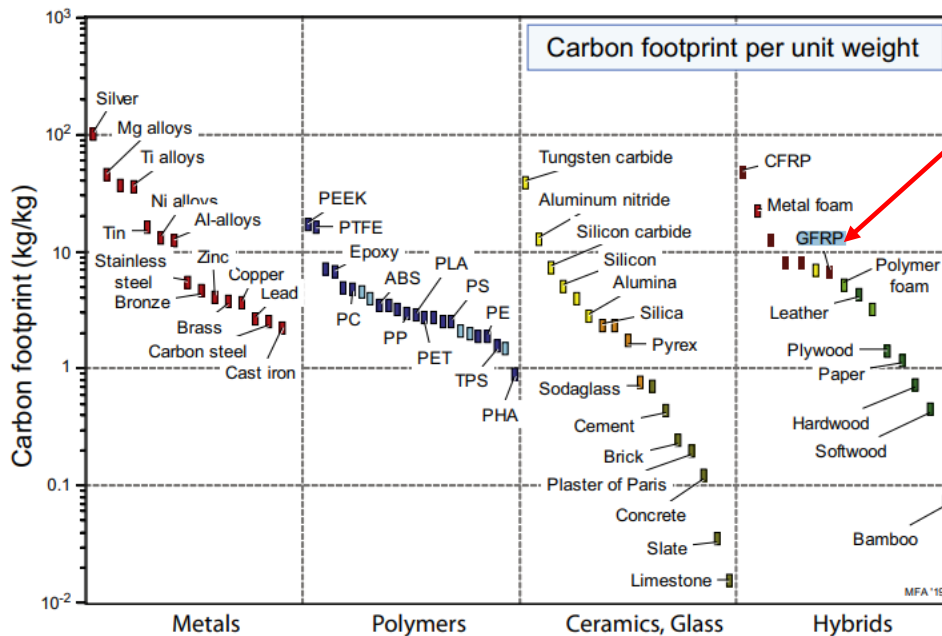


Figura 19 – Gráfico de Resistência - Densidade dos vários tipos de materiais (Ashby, 2021).

Ainda que, comparados com outros materiais, nomeadamente com materiais que tenham fibras de carbono, a FV apresente uma baixa pegada de carbono (Figura 20a)), o facto de representar um dos materiais mais produzidos a nível global pode trazer consequências ambientais, ainda mais se for considerada a pegada de carbono associada aos PRFV, ou FGRP na figura 20b) (Ashby, 2021).



a)



b)

Figura 20 – Pegada de carbono a) de diferentes fibras; b) de diferentes materiais, por peso (Ashby, 2021).

Na figura 21 é possível observar que, face ao seu preço de venda e produção anual, a produção da FV representa uma das indústrias mais lucrativas e de maior volume, sendo que a produção de PRFV representa cerca de 5 milhões de toneladas anuais (Ashby, 2021).

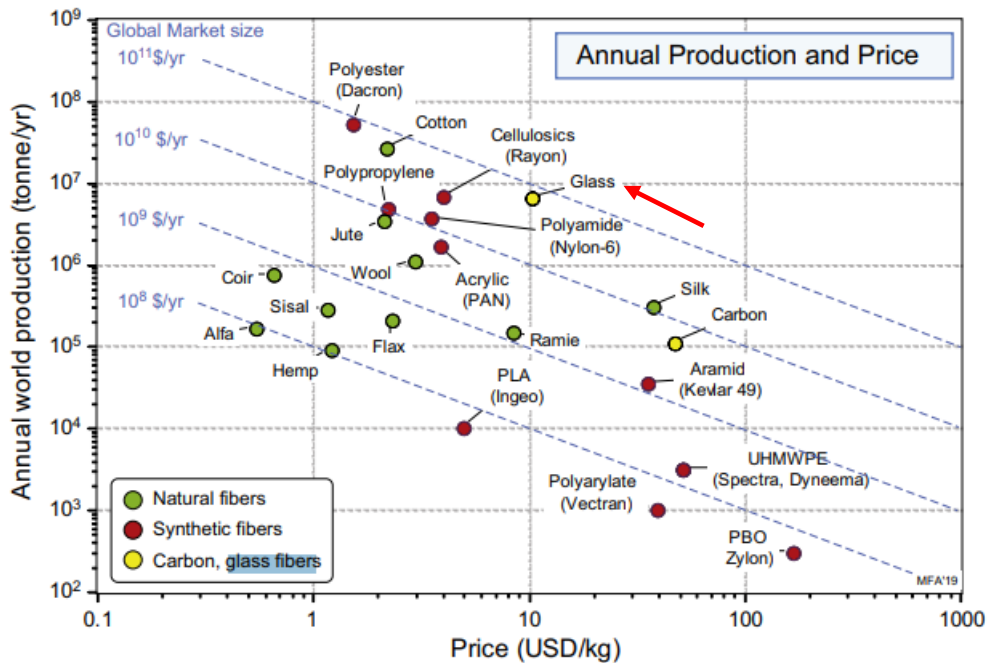


Figura 21 – Preço e volume anual de produção de vários tipos de fibras (Ashby, 2021).

No entanto, a utilização de produtos da reciclagem deste material não acompanha o seu volume de produção. Na Figura 22 é possível observar que os PRFV representam um dos materiais que apresenta uma taxa muito baixa de abastecimento de materiais reciclados, inferior a 1% (Ashby, 2021).

Dado que se trata de um dos materiais que mais aplicabilidade apresenta e é utilizado em diversas indústrias, é cada vez mais importante investir em técnicas para a sua reciclagem, nomeadamente dos PRFV, que permitam prevenir a geração de grandes quantidades de resíduos no futuro (Ashby, 2021; Fonte & Xydis, 2021; Chawla, 2019).

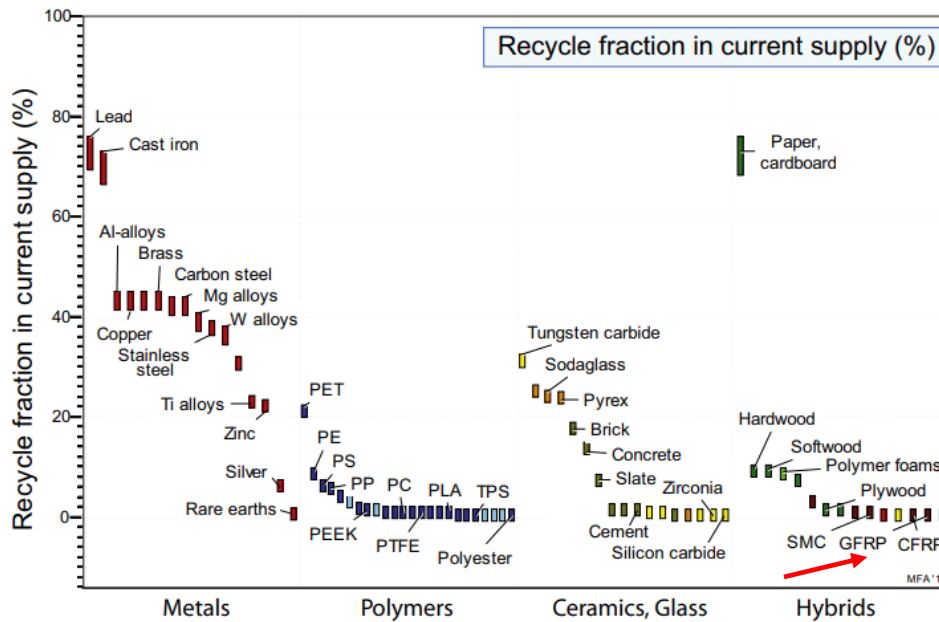


Figura 22 – Fração de material reciclado no abastecimento atual de material (Ashby, 2021).

4.3 Tipos de Reciclagem de Compósitos

Acompanhada da crescente dependência dos materiais compósitos e da sua aplicação na indústria, tem vindo a aumentar também a quantidade de resíduos que é necessário descartar (Bernatas et al., 2021). Como referido anteriormente, uma grande parte dos compósitos utilizados possuem uma matriz termoendurecível o que, pelas suas características, tornam a reciclagem dos mesmos muito difícil e por isso, no âmbito desta dissertação, apenas serão desenvolvidos em pormenor os métodos de reciclagem que se aplicam a compósitos de matriz polimérica e fibra de vidro.

Pode definir-se um processo de reciclagem como sendo qualquer operação de revalorização que torne resíduos em novos produtos, materiais ou substâncias, não incluindo a recuperação energética (Hagnell & Åkermo, 2019).

Os potenciais métodos de reciclagem podem dividir-se em três principais categorias, consoante os resultados obtidos: primários, secundários e terciários. As reciclagens primária e secundária surgem geralmente associadas, visto que estas envolvem a mistura de resíduos com material virgem, resultando num material novo, e apenas se distinguem pelas propriedades do material formado. No caso da primária, as propriedades são bastante semelhantes às do material virgem e no caso da secundária as propriedades são inferiores (Morin et al., 2012; Moura, Morais & Magalhães, 2010).

Estas duas categorias podem ser comumente designadas como recuperação do material ou reciclagem mecânica, descrita na subsecção seguinte, e resultam geralmente em *fillers* para outros materiais. A reciclagem terciária está associada à decomposição química ou térmica do polímero em substâncias químicas. Esta classificação é geralmente associada às reciclagens térmica e química (Morin et al., 2012) que serão descritas nas subsecções seguintes. Na figura 23 apresenta-se um resumo dos diversos tipos de reciclagem, os produtos que geralmente resultam deles e de que modo podem ser reutilizados.

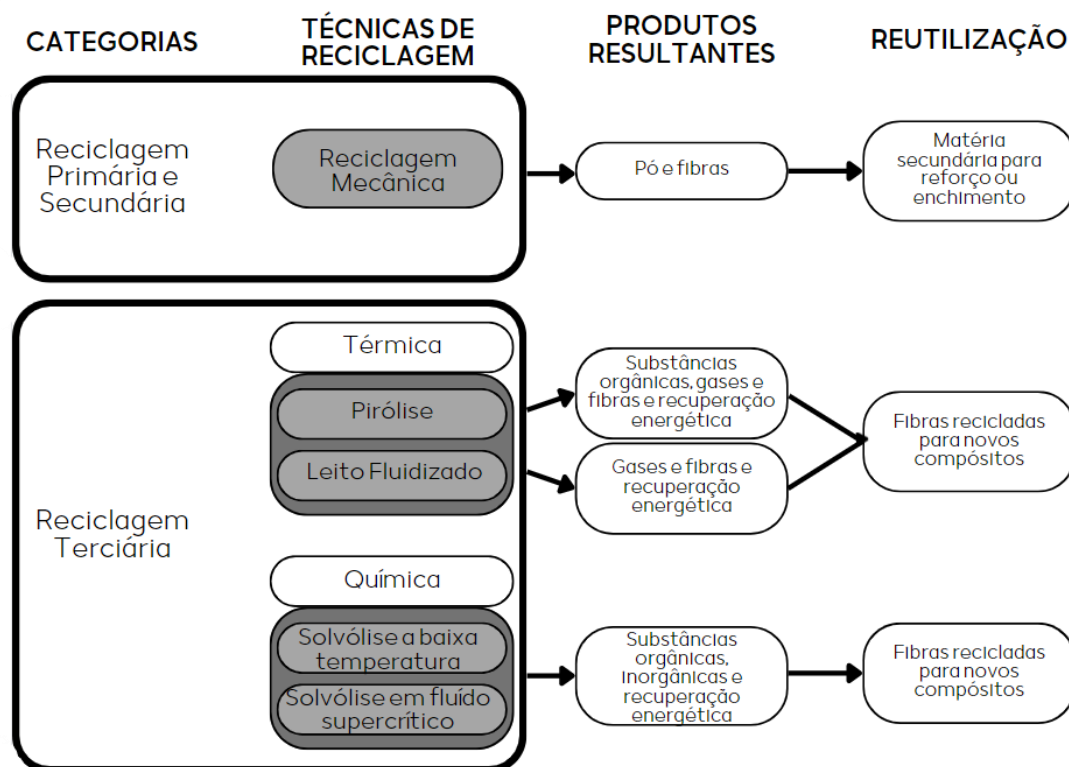


Figura 23 – Classificação dos tipos de reciclagem. Adaptado de Morin et al. (2012).

4.3.1 Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica consiste na utilização de processos mecânicos, também denominados físicos, para diminuir gradualmente o tamanho do material reciclado. Esta diminuição de tamanho ocorre geralmente por fases, começando por uma fase de corte e esmagamento, resultando em frações de 50 a 100mm e, numa segunda fase, a maior velocidade, ocorre um processo de moagem/esmerilhamento, podendo o material atingir dimensões entre os 50 μm e os 10mm. De seguida, consoante a sua constituição, estas partículas resultantes são divididas em ricas em reforço ou ricas em matriz, sendo também separadas consoante o seu tamanho (Bernatas et al., 2021; Krauklis et al., 2021; Kalkanis et al., 2019). É necessário ter em consideração que, no caso de o material possuir, por exemplo,

reforços também de metal, estes dificultam a redução do tamanho visto que, quanto mais homogênea for a composição, mais simples é a sua reciclagem (Krauklis et al., 2021).

Ainda que, este método de reciclagem represente uma mais-valia para o ambiente no que diz respeito à poluição atmosférica e de águas, os produtos que resultam dele têm um baixo valor agregado e apresentam uma grande quantidade de material desperdiçado, não compensando em termos financeiros, sendo a principal desvantagem deste tipo de reciclagem, a impossibilidade de obtenção de fibras contínuas (Dorigato, 2021; Giorgini et al., 2016). No entanto, é possível encontrar casos em que os produtos resultantes da reciclagem mecânica são utilizados como *fillers* de novos compósitos, tais como betão ou matrizes de polipropileno, ainda que já seja possível encontrar *fillers* de carbonato de cálcio ou sílica a custos mais baixos (Dorigato, 2021; Baturkin et al., 2021; Krauklis et al., 2021).

4.3.2 Reciclagem Química

A reciclagem química consiste num conjunto de processos químicos que levam à degradação da matriz e conseqüente separação das fibras, sendo possível aproveitar as fibras. Ainda que inicialmente o principal objetivo fosse apenas a recuperação das fibras, alguns estudos demonstram que a decomposição de matrizes termoendurecíveis resulta em alguns produtos aplicáveis noutros materiais (Dorigato, 2021).

A reciclagem química consiste maioritariamente em processos de solvólise, com recurso a diferentes solventes e a temperaturas controladas, conseguindo-se assim recuperar a matriz e as fibras eficazmente (Dorigato, 2021). No entanto, muitos dos solventes utilizados são tóxicos, ainda que as fibras resultantes obtenham bons resultados (Krauklis et al., 2021). Este processo pode ser realizado em diversas combinações de tempo, temperaturas e agente solvente, ocorrendo maioritariamente com água ou soluções de ácidos, como por exemplo o nítrico (Karuppanan Gopalraj & Kärki, 2020).

Já é possível, através da utilização de solventes e de catalisadores, quebrar apenas ligações específicas, o que resulta numa separação da resina e das fibras limpas sem a formação de resíduos indesejados. Com a utilização de catalisadores também foi possível diminuir a temperatura e pressão utilizadas nos processos, no entanto, a necessidade de aumentar a acidez do meio leva a um aumento do perigo associado ao processo e ao descarte das soluções utilizadas (Bernatas et al., 2021).

Ainda que já existam alguns processos laboratoriais que permitem a reciclagem e reaproveitamento dos PMC de matriz termoendurecível, muitos deles estão num estado

primário da investigação devido à toxicidade e custos associados aos mesmos (Krauklis et al., 2021; Dorigato, 2021).

4.3.3 Reciclagem Térmica

A reciclagem térmica tem como principal objetivo separar as fibras da matriz e pode ser efetuada através de vários processos, sendo os mais conhecidos e comuns de ver aplicados a pirólise, o leito fluidizado e a combustão (Krauklis et al., 2021). Estes processos têm como principal objetivo separar as fibras da matriz, de modo a reaproveitar as fibras para outros materiais, através da volatilização da matriz (Pegoretti, 2021).

A pirólise é um processo de decomposição térmica que consiste na incineração dos polímeros a uma temperatura e atmosfera controlada (Jensen & Skelton, 2018; Giorgini et al., 2016). Embora, este processo apresente bastantes vantagens, nomeadamente quanto ao material que pode ser reciclado e ao aproveitamento de todos os materiais resultantes da reciclagem, a qualidade das fibras resultantes é inferior às obtidas com processos de reciclagem química (Krauklis et al., 2021).

Neste processo, as matrizes ficam reduzidas a pó ou óleos, que podem depois ser utilizados noutros processos, e as fibras resultantes podem ser recuperadas. Devido às elevadas temperaturas a que o processo decorre, as fibras extraídas apresentam muitas vezes resíduos ou deteriorações que prejudicam as suas propriedades mecânicas, podendo levar à necessidade de ainda serem aplicados processos de limpeza das mesmas (Bernatas et al., 2021; Schmid et al., 2020; Kalkanis et al., 2019). A necessidade da utilização de temperaturas elevadas para processar as matrizes termoplásticas ou de resina epóxi tem um impacto bastante negativo na qualidade das fibras, o que torna este processo pouco atrativo quando o objetivo é manter as propriedades da fibra o mais semelhante possível às das da fibra virgem (Schmid et al., 2020; Hagnell & Åkermo, 2019).

O processo em leito fluidizado apresenta características únicas pois apresenta a possibilidade de reciclar material misturado, ou seja, que apresente outros componentes além das matrizes poliméricas com fibra, como por exemplo, superfícies pintadas ou compósitos em sanduíche com camadas interiores de espuma (Bernatas et al., 2021; Schmid et al., 2020). Ainda que este processo apresente boas características no que se refere aos custos e consumos energéticos, ainda não foi totalmente bem-sucedido em termos da sua escalabilidade para o meio industrial (Hagnell & Åkermo, 2019). Apresenta também uma grande desvantagem face à pirólise no que diz respeito aos materiais aproveitados, visto que

ocorre uma maior degradação das fibras e da matriz, levando a uma diminuição do material que pode ser aproveitado (Bernatas et al., 2021)

No que se refere à incineração e combustão dos materiais, a sua classificação enquanto método de reciclagem térmico não é consensual. Alguns autores consideram que esta se deve considerar um método de reciclagem térmica (Bernatas et al., 2021; Krauklis et al., 2021). No entanto, considerando a definição de reciclagem que apenas se aplica ao reaproveitamento de material e não de energia, a incineração apenas se traduz no método de reaproveitamento energético e não de reciclagem de materiais (Karuppanan Gopalraj & Kärki, 2020; Hagnell & Åkermo, 2019).

4.4 Exemplos Práticos de Reaproveitamento de Pás de Rotor

Nesta secção são apresentados alguns casos de estudo e artigos que procuraram testar diversas metodologias de reciclagem de compósitos e algumas especialmente focadas na reciclagem de PRFV provenientes de aerogeradores.

Na Tabela 4 é possível observar um breve resumo dos estudos que no âmbito desta dissertação se consideram mais relevantes.

Tabela 4 – Quadro resumo de diversos estudos sobre o reaproveitamento de PRFV.

Autor	Abordagem	Foco	Resumo
Baturkin et al. (2021)	Reciclagem Mecânica	Aerogeradores	Há incorporação no cimento na forma de fibras, pó e agregados, sendo que os resultados para as fibras se destacam pela positiva.
Dorigato (2021)	Reciclagens mecânica e termoquímica	Aerogeradores	Elaborou um resumo dos prós e contras das diferentes metodologias de reciclagem.
Fonte & Xydis (2021)	RM, RQ e RT	Aerogeradores	Revisão sistemática da literatura sobre a temática da reciclagem, dando destaque à mecânica, quando tendo em conta a relação qualidade resultante – simplicidade.
Korniejenko et al. (2021)	RM, RQ e RT	Reaproveitamento de materiais	Revisão sistemática da literatura sobre a temática da reciclagem focando-se nos prós e contras de cada uma e apresentando diversos casos de estudo.
Krauklis et al. (2021)	RM, RQ e RT	Aerogeradores	Revisão sistemática da literatura sobre os diversos tipos de metodologias de reciclagem e meios de reaproveitamento das pás de rotor.

Oliveira et al. (2020)	Reciclagem Mecânica	Aerogeradores	Caso de estudo sobre a utilização dos produtos resultantes da RM enquanto constituinte de betão e dos benefícios que este traz para algumas aplicações.
Hagnell & Åkermo (2019)	RM, RQ e RT	Reaproveitamento de materiais	Revisão sistemática da literatura sobre a temática da reciclagem focando-se na viabilidade económica das metodologias.
Naqvi et al. (2018)	Reciclagem Termoquímica	PRFV	Focaram-se na reciclagem e reutilização de PRFV e FC e na sua reinserção noutros materiais.

Legenda: RM – Reciclagem Mecânica; RQ – Reciclagem Química; RT – Reciclagem Térmica

Krauklis et al. (2021), procuraram identificar diversas soluções para a problemática do fim do ciclo de vida dos aerogeradores, focando-se na reutilização das pás seccionadas e na reciclagem das mesmas. Os autores destacam ainda algumas das desvantagens das fibras recicladas, nomeadamente no que diz respeito à perda de características mecânicas superiores a 50% face à fibra virgem. Na Figura 25 é possível observar alguns exemplos de reaproveitamento que os autores referem.



Figura 24 – Exemplos de Reaproveitamento de Pás de Rotor (Krauklis et al., 2021).

Com o objetivo de analisar os efeitos que resultam da utilização de produtos da reciclagem mecânica das pás de rotor como fonte de sílica na produção de betão, Baturkin et al. (2021) utilizaram material proveniente de aerogeradores de uma empresa canadiana, optando por se focar na reciclagem das pás do rotor, uma vez que já é comum encontrar empresas que façam a reciclagem das restantes partes, nomeadamente a torre e o *hub*. Estes consideram que devido à sua riqueza em silicatos, os resíduos derivados do fim de vida dos aerogeradores representam uma solução que preza pelo desenvolvimento sustentável. Assim, de modo a melhor compreender a influência da substituição de alguns componentes pelos resíduos, dividiram o estudo em três hipóteses distintas: como substituição do

cimento em si, como substituição dos agregados ou através da incorporação das fibras como reforço. Com este estudo concluíram que, independentemente das percentagens utilizadas, apenas quando usados como fibras para reforço não ocorre uma perda considerável da resistência à compressão e ainda ocorre uma melhoria da resistência à flexão, características essenciais, dadas as solicitações que o cimento sofre (Baturkin et al., 2021). Oliveira et al. (2020), também procuraram estudar o efeito da utilização de material resultante da reciclagem mecânica das pás de rotor em betão, concluindo também que esta adição representa uma ótima solução para a gestão dos resíduos. Os autores destacam ainda que o decréscimo que corre na densidade do novo material permite que este seja ainda mais indicado para algumas aplicações, como por exemplo, revestimento de paredes e tetos (Oliveira et al., 2020).

Fonte e Xydis realizaram uma revisão sistemática da literatura sobre o potencial da recetividade do mercado europeu quanto aos materiais resultantes dos diversos tipos de metodologias de reciclagem referidas, destacando os benefícios de reciclagem mecânica face, por exemplo, à pirólise ou ao leito fluidizado devido à simplicidade do processo, ainda que este resulte numa redução de cerca de 30% de algumas propriedades mecânicas (Fonte & Xydis, 2021).

No mesmo ano, Dorigato comparou os diversos tipos de metodologias de reciclagem, focando a sua avaliação na reciclagem mecânica e no método combinado de reciclagem termoquímica, procurando explicar como estes se processam e quais os seus benefícios, referindo ainda como diversas partes do aerogerador são processadas no final do ciclo de vida (Dorigato, 2021).

Korniejenko et al., realizaram uma compilação de alguns casos de estudo na temática do reaproveitamento de materiais reciclados, nomeadamente de reaproveitamento de pneus e das pás de rotor de aerogeradores. Os autores destacaram que, ainda que atualmente já existam inúmeros métodos de reciclagem, não há nenhum que se destaque, ainda que apresente diversas vantagens e desvantagens para cada um (Korniejenko et al., 2021).

Hao et al., 2020 optaram por focar a sua análise na reciclagem térmica de polímeros reforçados com FC ao invés de PRFV, por estas serem as utilizadas nas construções das novas LCI. Em 2018, Naqvi et al. Procuraram também analisar diferentes casos de estudo que envolviam economia circular no âmbito de materiais reforçados com FV e FC (Naqvi et al., 2018)

Em 2019, Hagnell e Akermo procuraram, através de uma revisão sistemática da literatura, identificar quais as melhores opções e criar um modelo de apoio à decisão que permitisse selecionar o melhor método de reciclagem consoante a necessidade de características mecânicas e limitações económicas. Através da análise de vários métodos os autores concluíram que, por exemplo no caso da utilização de fibras de carbono de resíduos provenientes de estruturas em fim de vida recicladas, pode ocorrer uma diminuição de até 50% dos custos de materiais (Hagnell & Åkermo, 2019). Também sob o modo de revisão sistemática, Jensen e Skelton procuraram, em 2018, compreender quais os desafios associados à gestão de resíduos de compósitos, nomeadamente através da sua reciclagem (Jensen & Skelton, 2018).

Segundo Ashby (2021), a reciclagem deve basear-se em dois passos principais, separação e reconhecimento, e por isso, neste sentido, torna-se essencial ter conhecimento acerca dos diversos constituintes dos aerogeradores e dos diversos métodos de reciclagem que podem ser aplicados neles, alguns já contemplados neste capítulo. Sendo que, como referido anteriormente, se prevê a geração de cerca de 43 milhões de toneladas deste tipo de resíduos (Fonte & Xydis, 2021) e que as tecnologias de reciclagem destes materiais têm emergido e têm sido um dos focos da comunidade científica no que diz respeito aos problemas associados, torna-se cada vez mais imperativa a consciencialização para esta problemática. É importante notar que, só da produção das pás de rotor, está-se perante um desperdício material na casa dos 10% por cada pá de 5,4 toneladas, ainda associado a cerca de 120kg de materiais consumíveis utilizados (Dorigato, 2021).

Assim, no capítulo seguinte são descritos os componentes de um aerogerador, assim como o ciclo de vida associado aos mais relevantes no âmbito desta dissertação, com o objetivo de compreender a importância da reciclagem dos mesmos.

Capítulo 5

Problemática das Pás de Rotor dos Aerogeradores no Fim de Ciclo de Vida

Neste capítulo são apresentados os vários componentes de um aerogerador e os seus constituintes materiais, assim como o seu ciclo de vida e diversas opções para o seu fim. São abordados também alguns desafios respeitantes às opções disponíveis no final do seu ciclo de vida de vida.

5.1 Componentes e Materiais do Aerogerador Eólico

Um aerogerador apresenta diversos componentes essenciais ao seu funcionamento. Entre eles, ao nível visual destacam-se a torre, a base ou fundação, o rotor e as suas pás. Na Figura 25 é possível identificar os diversos componentes, dando destaque ao *hub*, o local onde se encontram todos os componentes que dizem respeito à transformação energética.

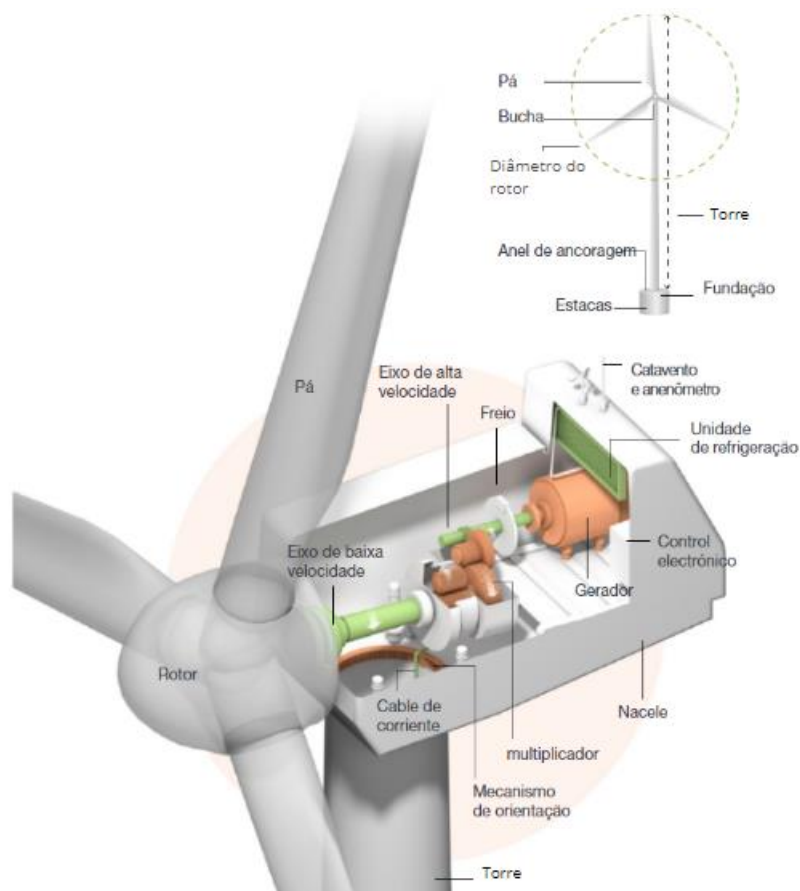


Figura 25 – Ilustração dos componentes base de um aerogerador (Iberdrola, 2022b).

Esta transformação energética inicia-se com a sua produção, sob a forma de energia cinética quando o vento atinge as pás do aerogerador, sendo que o seu movimento do ar aciona a rotação do rotor que por sua vez aciona o eixo, produzindo energia mecânica. Esta energia mecânica é de seguida encaminhada por um sistema de engrenagens multiplicador que aumenta as rotações, sendo então transmitida ao gerador que a transforma em energia elétrica (Neoenergia, 2022). Todos os componentes necessários ao processo desde a rotação das pás até à transmissão da energia apresentam diferentes constituintes ao nível do material, conforme ilustrado na Figura 26.

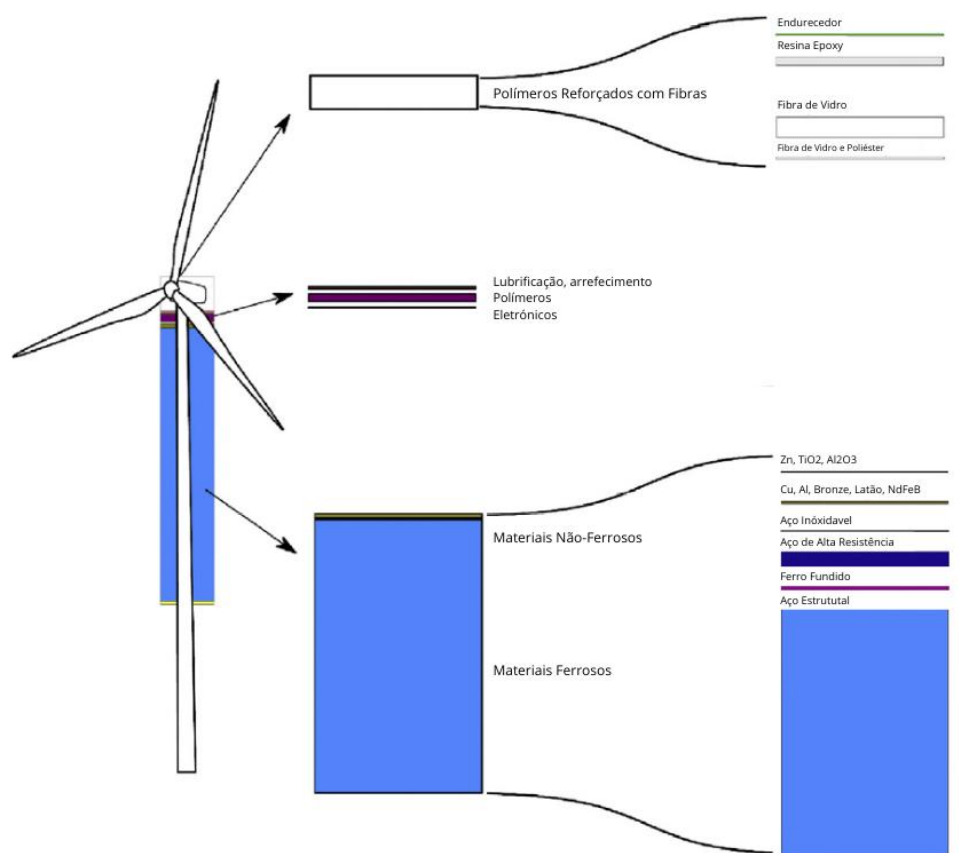


Figura 26 – Componentes Materiais de um Aerogerador (Dorigato, 2021).

Na figura 26 são apresentados os diversos constituintes de um aerogerador e os principais materiais que o constituem, sendo possível identificar uma grande quantidade de materiais ferrosos, utilizados na torre, como o aço inoxidável ou de alta resistência, mas também uma grande quantidade de fibra de vidro, associada aos polímeros utilizados nas pás do rotor (Dorigato, 2021). Ainda que não seja referido na Figura 26, dependendo do tamanho e fabricante do aerogerador, a quantidade de madeira utilizada como núcleo do compósito sanduíche também se pode tornar considerável (Dorigato, 2021; Jensen & Skelton, 2018).

Ainda que mais de 80% do aerogerador seja constituído por materiais recicláveis, nomeadamente os diversos metais que o constituem, cerca de 11 a 16% representam materiais compósitos de difícil ou impossível reciclagem (Lee & Zhao, 2021).

Estes materiais considerados de difícil reciclagem, devido à dificuldade em separar a matriz da fibra (Oliveira et al., 2020) nomeadamente os PRFV, podem apresentar diferentes percentagens de composição, dependendo do fabricante e tamanho do aerogerador e das suas pás de rotor.

Na Figura 27 é possível observar um exemplo da distribuição dos constituintes identificados, neste caso, nas pás de rotor de um aerogerador considerado num estudo sobre os diferentes tipos de reciclagem utilizáveis quando se aborda a problemática dos resíduos resultantes das LCI (Korniejenko et al., 2021). Os materiais denominados “Outros” na figura 27 representam constituintes associados a revestimentos, adesivos e outros que são utilizados em menores quantidades, nomeadamente a madeira utilizada como núcleo do compósito em alguns aerogeradores. É possível concluir que grande parte dos constituintes das pás são PRFV e as suas fibras, sendo que estas podem representar cerca de 50% do seu volume material (Korniejenko et al., 2021; Dorigato, 2021; Jensen & Skelton, 2018).

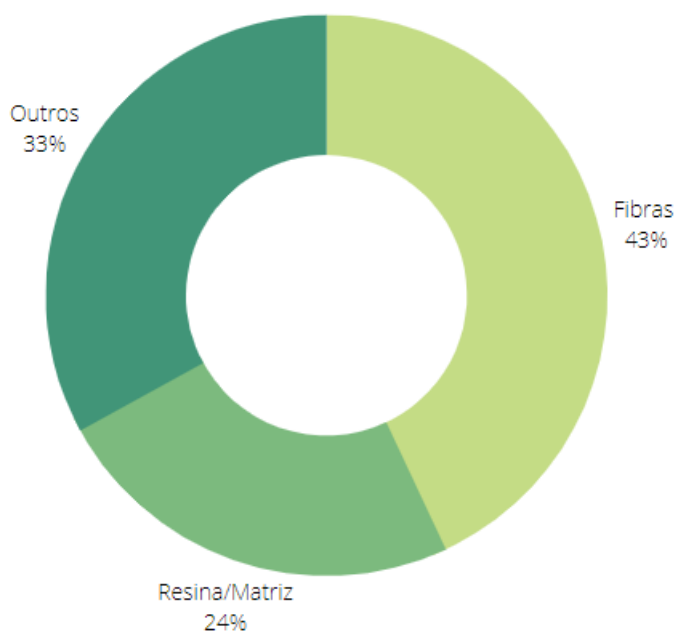


Figura 27 – Distribuição percentual do tipo de material constituinte da pá de rotor, adaptado de Korniejenko et al. (2021).

Tendo em consideração, a previsão de crescimento do setor eólico, abordado no capítulo 2, e que os PRFV representam cerca de 70% dos materiais que constituem as pás de rotor, espera-se também que a quantidade destes cresça igualmente nos próximos anos (Jensen & Skelton, 2018). Ao nível de estimativas europeias, prevêem-se cerca de 50 mil toneladas de pás de rotor já tenham atingido o seu fim de ciclo de vida até ao presente ano, e, até 2050 espera-se que este valor aumente cerca de 2 milhões de toneladas anualmente, quando consideradas as estimativas globais (Liu & Barlow, 2017).

Na Figura 28 é possível observar uma estimativa desta utilização durante os próximos anos, tendo em conta o seu crescimento nas últimas décadas e o que se prevê no setor, considerando as políticas e incentivos às energias renováveis (Jensen & Skelton, 2018).

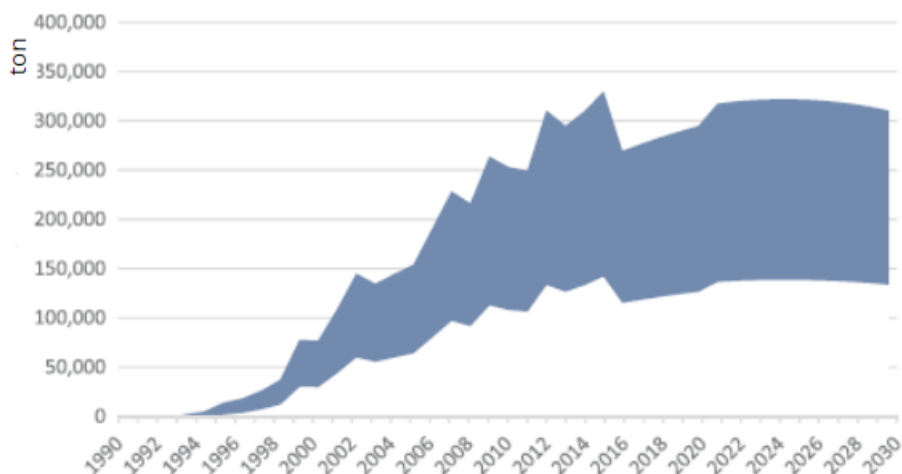


Figura 28 – Expectativa de utilização anual de PRFV em pás de rotor de aerogeradores (Jensen & Skelton, 2018).

Dado que o tempo de vida útil das pás de rotor se situa entre os 20 e os 25 anos (Jensen & Skelton, 2018), torna-se necessário identificar estratégias que permitam gerir a grande quantidade de resíduos materiais que vão surgir nos próximos anos, resultantes do fim de vida dos aerogeradores de 1ª geração instalados nos parques eólicos.

Para se poder ter uma ideia da dimensão, em termos quantitativos, desta problemática em Portugal elaborou-se uma estimativa dos resíduos que irão ser gerados anualmente com fim do ciclo de vida dos parques eólicos de 1ª geração. Para realizar esta estimativa foram utilizados os dados sobre a potência instalada e o ano de instalação do parque (INEGI, 2022a). Definiu-se que as pás de rotor teriam um ciclo de vida útil de 20 anos, dado que este valor varia de acordo com o fabricante, podendo ser entre 15 e 20 anos, optou-se pelo cenário mais favorável. E por fim, de acordo com Larsen (2009), por cada MW de potência instalada são geradas 10 toneladas de resíduos de materiais compósitos de fibra de vidro,

foi usada esta proporção para estimar o peso dos resíduos que seriam gerados. Esta estimativa é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Estimativa dos resíduos que irão ser gerados anualmente com fim do ciclo de vida dos parques eólicos de 1ª geração (INEGI, 2022a; Larsen, 2009)

Ano	Resíduos Gerados [Ton]	Valor acumulado de resíduos gerados [ton]
2016	272,20	272,20
2018	291,00	563,20
2019	117,00	680,20
2020	421,00	1.101,20
2021	417,00	1.518,20
2022	975,50	2.493,70
2023	929,00	3.422,70
2024	3.477,00	6.899,70
2025	5.516,00	12.415,70
2026	7.584,10	19.999,80
2027	3.394,10	23.393,90
2028	7.863,00	31.256,90
2029	4.634,00	35.890,90
2030	6.491,00	42.381,90
2031	2.143,00	44.524,90
2032	860,00	45.384,90

Ao analisar a tabela anterior, é possível verificar que desde 2016 deverão existir pás de rotor nos parques eólicos portugueses, que já atingiram o fim do seu ciclo de vida (FCV). No entanto, não foi possível encontrar informação sobre os procedimentos que as empresas, que estão a explorar os parques eólicos, têm adotado quando as pás de rotor atingem o FCV.

Até 2032 serão geradas cerca de 45 mil toneladas de resíduos, que, se nada for feito no que diz respeito à sua reciclagem ou reutilização, irão muito certamente terminar num aterro sanitário. Encontrar alternativas para esta problemática é urgente, porque de acordo com o estimado em 2022 este problema já tem a dimensão de cerca de 2.500 toneladas de resíduos de materiais compósitos de fibra de vidro. Como medida preventiva para os resíduos que irão surgir no futuro, mas também como solução para os presentes, torna-se necessário avaliar o ciclo de vida dos aerogeradores, com vista à prevenção e delineação de estratégias e alternativas.

5.2 Ciclo de Vida de um Aerogerador

No caso das pás de rotor dos aerogeradores, o seu tempo de vida útil pode terminar por diversas razões, sendo as mais comuns devido a falha ou fadiga, podendo também terminar

o seu tempo de utilização quando estas deixam de satisfazer as necessidades dos fornecedores e são substituídas por outras (Davidsson et al., 2014). Assim, torna-se imperativo analisar o seu ciclo de vida (CV).

Na Figura 29 é possível observar um esquema que retrata o CV de uma pá de rotor, contemplando todo o processo de manufatura, iniciando-se na procura das matérias-primas, até à desativação dos parques eólicos e considerando duas opções para o final do seu CV: reciclagem e reutilização.



Figura 29 – Ciclo de Vida das Pás de Rotor (Lee & Zhao, 2021).

Este CV surge de uma abordagem *C2C*, ou seja, do início ao fim de vida, que procura analisar os impactes que o aerogerador representa. É importante considerar a produção destas enquanto parte integrante e importante do ciclo visto que, nas suas diferentes fases de vida, as pás apresentam diversos fatores a ter em preocupação, podendo estes estar associados, por exemplo, a emissões ou resíduos (Lee & Zhao, 2021).

No que diz respeito, às emissões associadas a parques eólicos, ainda que cerca de 90% das causadas por parques *onshore* provenham da sua produção e instalação, este valor decresce

para 70% quando se refere a parques *offshore*. Este decréscimo deve-se às emissões associadas ao transporte que no segundo representa uma fatia maior e por isso requer maior atenção aquando da avaliação (Lee & Zhao, 2021). Assim, é importante avaliar os diferentes estágios do ciclo e as suas variantes. Ainda que o tempo de *payback* das emissões seja relativamente curto face ao tempo de utilização destas, apenas alguns meses, é necessário identificar também soluções possíveis para a sua diminuição (Lee & Zhao, 2021).

No entanto, quando se considera a problemática dos resíduos associados às pás de rotor, esta é mais evidente aquando da sua produção, operação e fim de vida. Durante a produção das pás, ocorre um desperdício de material que representa 10 a 18% do peso total da lâmina, não considerando os materiais consumíveis associados à sua fabricação, e, durante a sua operação e manutenção, estes resíduos representam um desperdício de cerca de 3%, associado à manutenção e troca de pás, devido a danos (Dorigato, 2021; Jensen & Skelton, 2018).

Assim, ainda que também seja necessário focar a investigação na solução de um problema através da prevenção, através do foco em alternativas de design, vários estudos têm procurado solucionar uma problemática bastante presente, a problemática do fim do ciclo de vida (Baturkin et al., 2021; Fonte & Xydis, 2021; Mulvaney et al., 2021). De seguida, é apresentado um caso em que o foco da investigação foi o estudo de alternativas à colocação em aterro dos resíduos que resultam da desativação de aerogeradores eólicos.

Na Figura 30 é possível visualizar o ciclo de vida dos parques eólicos. Chegando ao fim do seu tempo de operação, é necessário tomar a decisão sobre o que fazer: desativação, reutilização das pás, extensão da vida útil do aerogerador, sendo que estes últimos dependem diretamente de boas políticas de manutenção e reparação e da viabilidade da sua substituição, sendo esta uma questão que se coloca principalmente nos modelos de 1^a geração (Korniejenko et al., 2021; Golden, 2021).

Atualmente, ainda não existem muitas opções disponíveis para o FVC dos parques eólicos. Sendo a decisão mais comum a desativação, e neste caso as pás de rotor podem ser reutilizadas, descartadas ou os materiais podem ser recuperados. A recuperação do material é opção mais sustentável e alinhada com a priorização de intervenções definida na hierarquia dos resíduos.

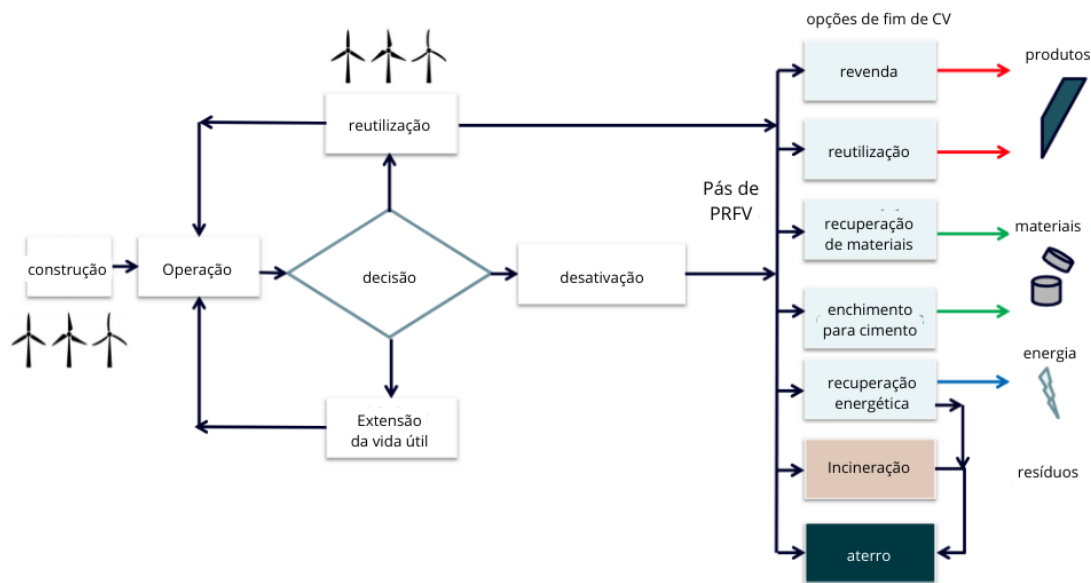


Figura 30 – Ciclo de vida dos parques eólicos (Golden, 2021).

Na figura 31 são apresentadas as várias opções disponíveis para o fim de CV das pás de rotor dos aerogeradores eólicos. É possível identificar os diferentes desafios associados a cada uma, à direita considerando o final do CV das pás de rotor e à esquerda considerando os resíduos que resultam da sua produção.

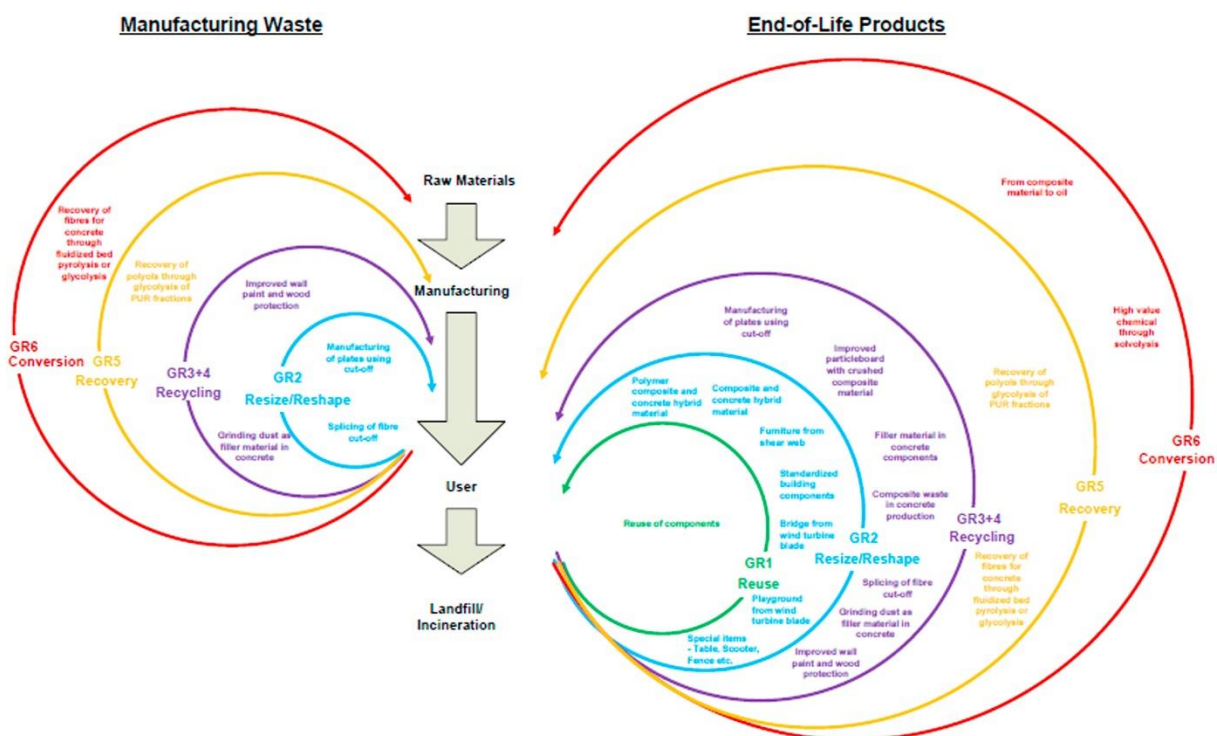


Figura 31 – Diagrama de Borboleta de pás de rotor de aerogerador (Jensen & Skelton, 2018).

No caso da reutilização ou revenda, é necessário garantir a total integridade dos materiais, o que leva à necessidade de os submeter a testes, nomeadamente de fadiga, e é necessário investir na otimização de processos de logística reversa que permitam que o seu transporte também se adeque ao nível ecológico (Jensen & Skelton, 2018).

Considerando a recuperação do material, existem duas opções: a alteração do tamanho ou forma para reutilização e a reciclagem.

Considerando a primeira, a alteração de tamanho ou forma, é de destacar a importância de preparar as pás para que estas possam ser processadas. Estas alterações do seu tamanho ou forma geralmente têm como principal objetivo um processamento que lhes permita serem empregues em novas aplicações, nomeadamente para reutilização (caso de pontes ou coberturas, como material estrutural, retratadas no capítulo anterior na Figura 24), ou para a produção de materiais híbridos, por exemplo em compósitos sanduíche de betão (Jensen & Skelton, 2018). Estas e outras utilizações após a alteração de tamanho e forma podem ser consultadas na Figura 31, a azul-claro.

Quanto à reciclagem, esta solução foi abordada em maior pormenor no Capítulo anterior, sendo importante destacar que a metodologia mais indicada depende do propósito da utilização do material reciclado, mas também do tamanho da secção de material a reciclar. Golden (2021) e Jensen & Skelton (2018) consideram para esta opção disponível para o final de CV apenas os tipos e reciclagem primária e secundária, ou seja, deixam de fora a reciclagem terciária, que incluem apenas como recuperação. Considerando o ciclo que diz respeito aos resíduos da produção, é possível aumentar a circularidade das pás de rotor através de aplicações preventivas, nomeadamente através da melhoria dos revestimentos utilizados, como tinta (Jensen & Skelton, 2018). Estas e outras soluções referentes à reciclagem são apresentadas a roxo na Figura 31.

A recuperação, ou reciclagem terciária diz então respeito aos restantes métodos de reciclagem não contemplados nas reciclagens primária e secundária, recorrendo a métodos químicos e térmicos para a recuperação de material. Este tipo de abordagem passa principalmente pela recuperação de fibras para que possam ser reinseridas no *loop* como matérias-primas, identificadas a amarelo na Figura 31 (Jensen & Skelton, 2018).

A conversão, ou recuperação energética, ocorre muitas vezes simultaneamente à recuperação das fibras, dependendo das metodologias utilizadas (Jensen & Skelton, 2018).

No capítulo seguinte é apresentado o Caso Prático, que diz respeito à reciclagem de laminados de fibra de vidro e epóxi, simulando os materiais encontrados nas pás de rotor.

Capítulo 6

Caso Prático

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados, os equipamentos e o procedimento experimental adotado na realização do caso prático. Por último, são apresentados os resultados e uma análise e discussão dos mesmos, agrupados consoante a temperatura de reciclagem das fibras. Com vista a atingir o principal objetivo desta dissertação, foi realizado um trabalho experimental de caracterização dos laminados compósitos, fabricados em laboratório através de técnica de moldação manual.

6.1 Materiais, Procedimento Experimental e Equipamento

O presente trabalho tem como objetivo ensaiar uma metodologia de reciclagem térmica, e a manufatura de novos laminados, tendo como base laminados previamente fabricados e reciclados, segundo vários tempos e temperaturas de queima. Assim, procurando dar resposta à questão inicial de qual seria o método que se traduziria no melhor reaproveitamento, procura-se compreender, através da avaliação das propriedades mecânicas face aos laminados com fibras de controlo, quais as melhores combinações de tempo e temperatura de reciclagem térmica.

6.1.1 Materiais e Procedimento Experimental

Foram inicialmente produzidos 13 laminados diferentes de fibra de vidro e resina epóxi: o de controlo e 12 com fibras previamente recicladas a diferentes combinações de tempo e temperatura de queima da resina num forno da marca *TermoLab* (Leite, 2020). Na Tabela 6 podem ser observadas as diferentes combinações utilizadas na reciclagem das fibras.

Tabela 6 – Combinações de temperatura e tempo de queima utilizadas.

Temperatura [°C]	Tempo de Queima [minutos]					
400	15	30	60	120	180	240
600	15	30	60			
800	5	10	15			

Todos os laminados foram fabricados com 6 camadas de fibra de vidro, impregnadas manualmente com resina epóxi SR 8100, combinada com o endurecedor SD 8824, ambos fornecidos pela empresa Sicomin.

Seguindo as indicações do fabricante, para cada 100 gramas de resina foram misturados 22% do peso da resina de endurecedor, ou seja, 22 gramas e, de modo a obter as melhores propriedades, optou-se por uma metodologia de cura de 24 horas à temperatura ambiente, seguida de 24 horas numa estufa a $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (Sicomin, 2019). As propriedades associadas a esta resina podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades da matriz, adaptado de (Sicomin, 2019).

Propriedades	Resina Sr8100 + Endurecedor SD8824 Curada a 24 H @ Ta + 24 H @ 40 °C
Resistência à Flexão [MPa]	- ²
Resistência à Tração [MPa]	50
Módulo de Rigidez à Flexão [MPa]	3 000
Módulo de Rigidez à Tração [MPa]	2 900
Deformação na Tensão Máxima (Flexão)	4,9%
Deformação na Tensão Máxima (Tração)	3,2%

No caso do laminado de controlo, foram utilizadas 6 camadas de fibra de vidro do tipo E, em malha de tafetá fornecida pela empresa Rebelco, sendo produzidos laminados com dimensões de 330x330mm. As propriedades associadas a este material podem ser consultadas na Tabela 8 e a fibra utilizada pode ser observada na Figura 32.

² Este valor não é fornecido pelos fabricantes da resina e do endurecedor.

Tabela 8 – Propriedades da Fibra de Vidro (Rebelco, n.d.).

Propriedades	Fibra de Vidro E
Densidade [g/m ²]	195
Espessura [mm]	0,17
Fio – Teia [mm]	80
Fio – Trama [mm]	60
Densidade [g/cm ³]	2,54
Módulo de Young [GPa]	74
Resistência à Tração [GPa]	2.500
Alongamento [%]	4,8

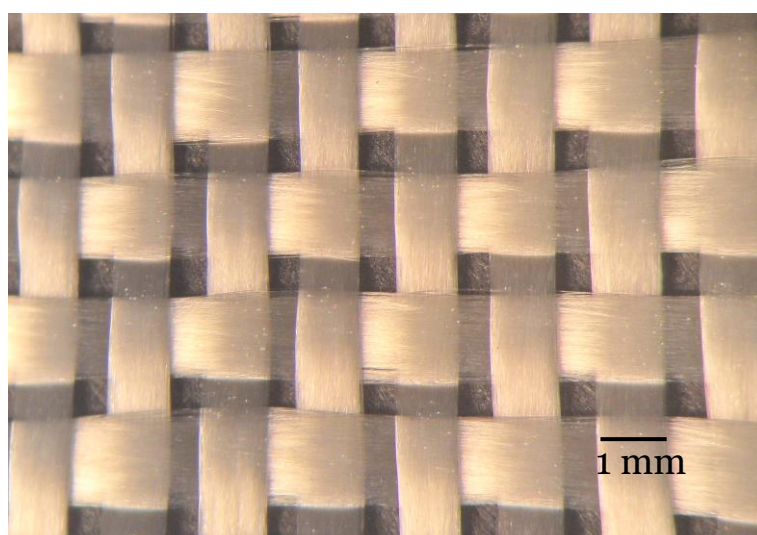


Figura 32 – Tecido de fibra de vidro utilizado no fabrico dos laminados.

No caso dos laminados de fibras recicladas, foram também utilizadas 6 camadas do mesmo tipo de fibra de vidro em cada, de dimensões aproximadamente 170x290mm.

Antes do fabrico dos laminados, foi necessário limpar as fibras, procurando eliminar pequenos resíduos soltos de cinzas e detritos de diferentes dimensões que ficaram retidas entre as várias camadas e nas superfícies dos laminados. Ainda que não tenha sido possível fazer uma limpeza na sua totalidade, devido à natureza das diversas impurezas incrustadas nas fibras e fragilidade das mesmas, foi efetuada uma limpeza manual com um pincel, de modo a não danificar a fibra e não acrescentar custos ao processo, seguida de uma inspeção visual. Ainda que este processo apresente a vantagem de acarretar custos reduzidos, a sua

demora e exigência podem levar a que, ao ser escalado para a indústria, seja necessário recorrer a outros meios de limpeza. Na Figura 33 é possível observar diferentes tipos de fibras recicladas e o seu estado de degradação.

Na fase inicial de fabrico dos diferentes laminados foi tido em consideração que é importante uma boa preparação da resina. Por isso, após a pesagem das quantidades corretas de resina e de endurecedor, estes foram agitados de forma lenta e cautelosa, para prevenir o mais possível a contaminação com bolhas de ar, pois estas podem traduzir-se em defeitos no laminado.

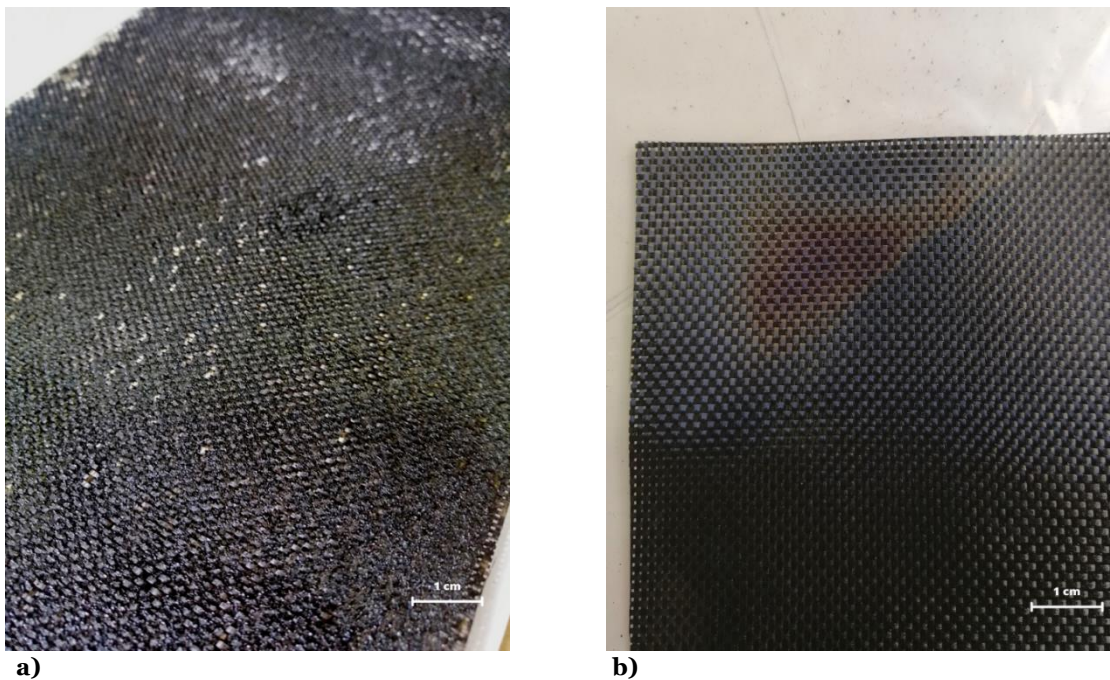
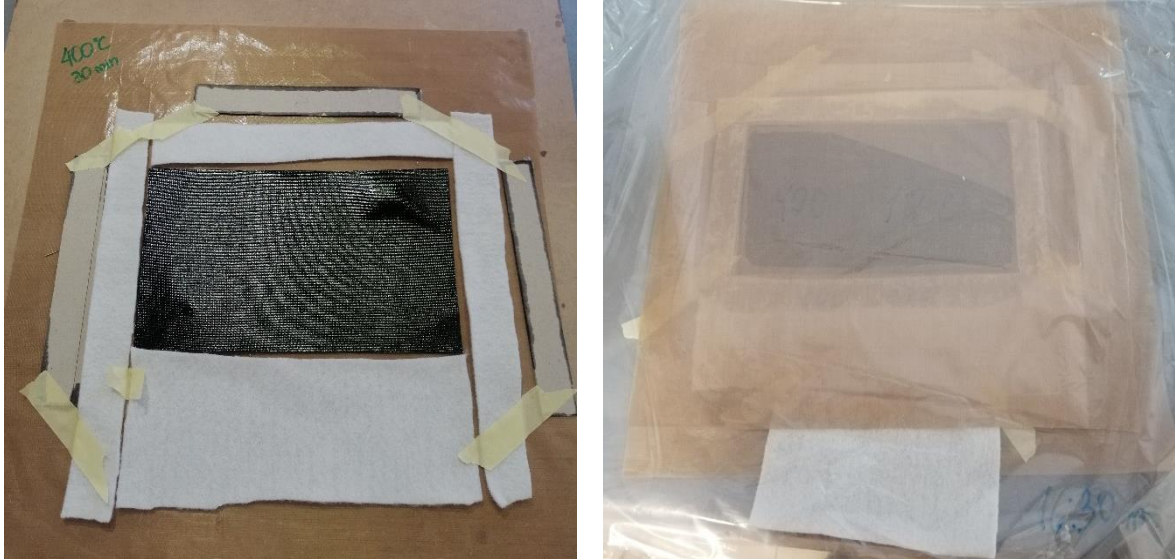


Figura 33 – Exemplos de impurezas presentes nas fibras após a reciclagem: a) fibra reciclada a 400°C/15min; b) fibra reciclada a 400°C/60min.

Após a obtenção de uma mistura visualmente homogênea, esta foi desgaseificada numa panela de vácuo durante 10 minutos a uma pressão de $-0,9 \pm 0,1$ bar. Durante este tempo foi visível a quantidade de diferentes bolhas de ar que foi possível extrair da mistura. De modo a promover uma distribuição uniforme da resina nas camadas, durante o processo de impregnação manual, esta foi medida e distribuída uniformemente.

Após a distribuição da resina, os laminados foram colocados em sacos selados a quente, e sujeitos a vácuo, simultaneamente nas primeiras 24 horas de cura à temperatura ambiente, a uma pressão de cerca de 2,5 kN numa prensa hidráulica e após este tempo, já à pressão ambiente, foram introduzidos durante mais 24 horas numa estufa a temperatura de 40°C.

É possível observar na Figura 34 (a) um exemplo do processo de fabrico do laminado após a impregnação das fibras de vidro recicladas colocação de uma tira de tecido absorvente e numa fase final após colocação de uma segunda folha de desmoldante e inserido no saco para posteriormente ser sujeito a vácuo Figura 34 (b).



a)

b)

Figura 34 – Exemplo de preparação de um laminado a) Durante o processo de fabrico manual; b) dentro do saco.

É possível observar na Figura 35 um exemplo de um laminado sujeito simultaneamente a vácuo e pressão durante as primeiras 24 horas de cura.



Figura 35 – Laminado no interior do saco, em vácuo e sujeito a pressão, na prensa hidráulica.

Posteriormente os laminados foram cortados em provetes. Os provetes aplicados na caracterização estática e viscoelástica, foram cortados com o auxílio de uma máquina de corte *Struers Accutom 2*, utilizando um disco diamantado e refrigerado a água, de modo a evitar o aquecimento do compósito tendo em conta a velocidade de avanço.

As dimensões associadas a estes provetes foram definidas tendo por base a norma BS EN ISO 178:2003, que define um método para determinar as propriedades de flexão de um termorrígido.(BS, 2003).

A norma define que o *span*, ou seja, a distância entre apoios (L) deve ser $L = (16 \pm 1) \times t$, considerando t como sendo a espessura média do material em questão (BS, 2003).

De modo a normalizar o valor utilizado para a espessura média dos materiais, foi sempre considerada a espessura do laminado de material de controlo. Assim, com uma espessura de cerca de $1,5 \pm 0,1$ mm, a distância entre apoios considerada foi de 25 mm.

Na Figura 36 é então possível observar um esquema referente aos ensaios de flexão em três pontos (F3P), com destaque para a geometria dos provetes (Figura 36a)).

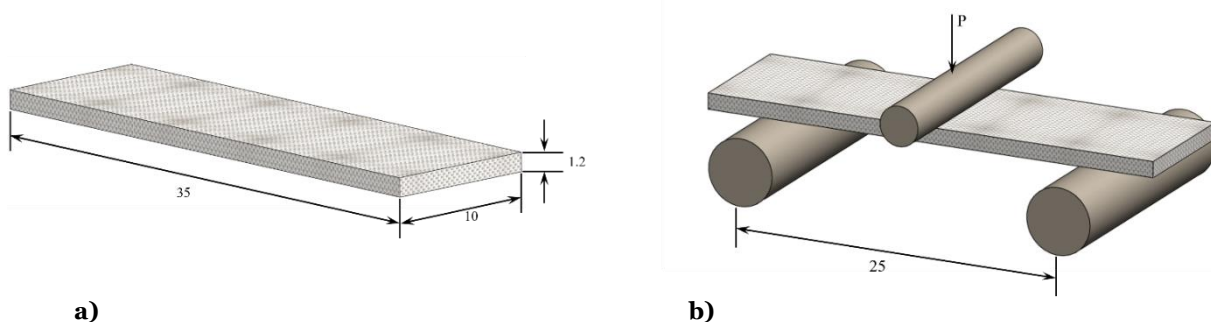


Figura 36 – Esquema do ensaio de F3P: a) Dimensões e geometria do provete; b) Montagem do ensaio. Todas as dimensões em mm.

No caso dos ensaios à tração, os provetes foram cortados na máquina Controlo Numérico Computorizado (CNC) de corte por jato de água *Pronum Water Jet* do laboratório FabLab, laboratório de fabricação da UBI, para caracterização dos diferentes laminados quando sujeitos a um esforço de tração. Na Figura 37 é possível visualizar a máquina de corte a jato aquando do corte dos provetes de tração do laminado de controlo.

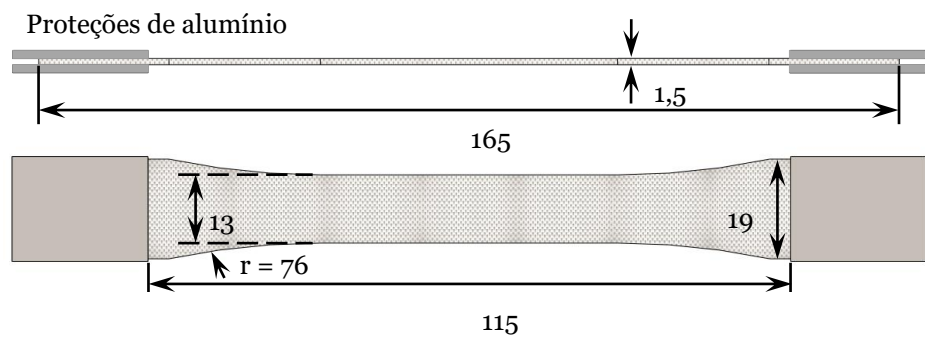


Figura 37 – Corte a Jato dos Provetes de Tração do Laminado de Controle.

As dimensões associadas a estes provetes seguiram as indicações da norma D638 – 14 da *ASTM International* (ASTM, 2014). Estes foram cortados no modelo comumente designado como “osso de cão” do Tipo 1 por apresentarem uma largura de cerca de 13mm. É possível observar um exemplo destes provetes na Figura 38.



a)

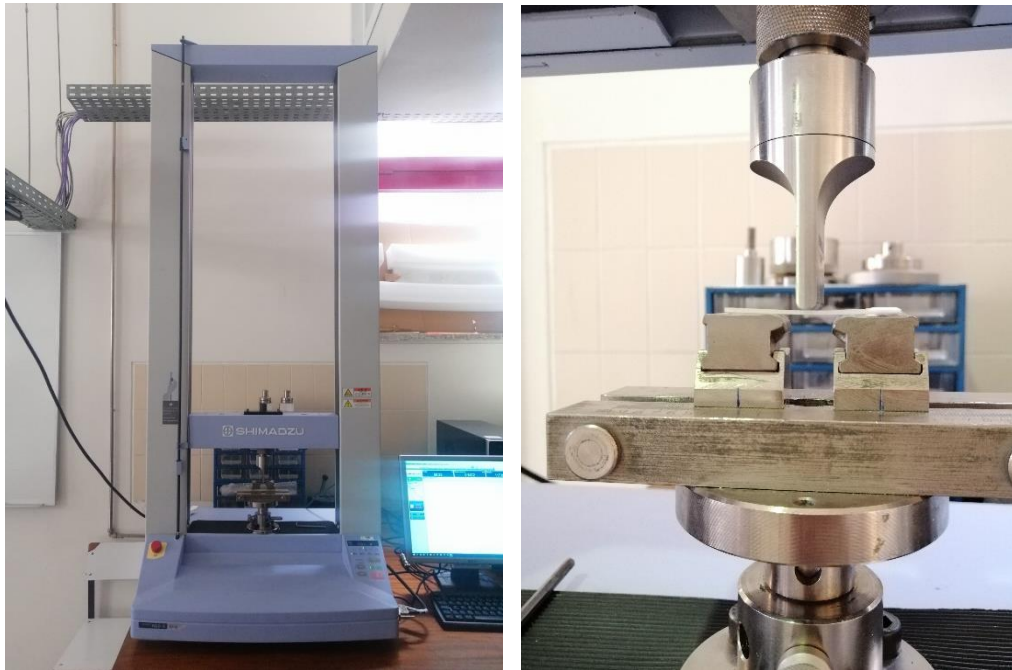


b)

Figura 38 – Exemplo da geometria do provete de ensaio à tração: a) Provete preparado para teste; b) Dimensões e geometria do provete em mm.

6.1.2 Equipamentos

Os provetes foram ensaiados em duas máquinas diferentes, de acordo com a natureza do ensaio. Os ensaios de flexão foram efetuados numa máquina universal da marca Shimadzu, modelo AGS-X, equipada com uma célula de carga de 10kN e para aquisição dos resultados, o software Trapezium X, versão 1.4.0. Figura 39, e para cada condição pelo menos cinco amostras foram testadas à temperatura ambiente.



a)

b)

Figura 39 a) Máquina de teste universal da marca Shimadzu, modelo AGS-X de célula de carga 10kN; b) Dispositivo de fixação para ensaio de flexão em 3 pontos, dinâmico e estático.

A resistência à flexão foi calculada como a tensão nominal na seção do meio do vão obtida utilizando o valor máximo da carga. A tensão nominal de flexão foi então calculada aplicando a equação:

$$\sigma = \frac{3.P.L}{2.b.h^2} \quad (1)$$

Onde P é a carga, L a distância entre apoios, b a largura e h a espessura do corpo de prova.

O módulo de rigidez foi calculado pela relação da teoria das vigas de flexão elástica linear:

$$E = \frac{\Delta P \cdot L^3}{48 \cdot \Delta u \cdot I} \quad (2)$$

Onde I é o momento de inércia da seção transversal e ΔP e Δu são, respectivamente, a variação de carga e a variação de deslocamento de flexão no meio do vão para um intervalo na região linear do gráfico carga versus deslocamento. O módulo de rigidez foi obtido por regressão linear das curvas de carga-deslocamento considerando o intervalo no segmento linear com um fator de correlação maior que 95%. A deformação à flexão foi calculada pela seguinte equação:

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot S \cdot h}{L^2} \quad (3)$$

Onde S é a deflexão, L o comprimento do vão e h a espessura do corpo de prova.

No que diz respeito a taxa de deformação, os ensaios foram realizados a velocidades de deslocamento de 200, 20, 2, 0,2 e 0,02 mm/min que, de acordo com a equação (4), correspondem as taxas de deformação que podem ser observadas na Tabela 9 para as diversas temperaturas caracterizadas.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon_f}{dt} = \frac{6 \times V_T \times h}{L^2} \quad (4)$$

Onde, ε_f é a deformação periférica da fibra, t é o tempo, V_T é a velocidade do terceiro ponto, L a distância entre apoios e h a espessura do corpo de prova.

Tabela 9 – Taxa de deformação associado às diferentes temperaturas, tendo em conta a velocidade.

Temperatura [°C]	Velocidade de Deslocamento [MM/MIN]				
	0,02	0,2	2	20	200
400	$2,54 \times 10^{-5}$	$2,54 \times 10^{-4}$	$2,54 \times 10^{-3}$	$2,54 \times 10^{-2}$	$2,54 \times 10^{-1}$
600	$2,55 \times 10^{-5}$	$2,55 \times 10^{-4}$	$2,55 \times 10^{-3}$	$2,55 \times 10^{-2}$	$2,55 \times 10^{-1}$
800	$2,72 \times 10^{-5}$	$2,72 \times 10^{-4}$	$2,72 \times 10^{-3}$	$2,72 \times 10^{-2}$	$2,72 \times 10^{-1}$

Nos ensaios de fluência e relaxação de tensões à flexão, de modo a garantir que estes são efetuados ainda no regime elástico, as cargas escolhidas para a sua realização correspondem a 50% da tensão média máxima verificada nos ensaios de flexão à velocidade de deformação

de 2mm/min. Devido às características dos materiais, optou-se por apenas efetuar estes ensaios nos materiais que, dentro da sua temperatura, apresentassem as melhores características. Assim, na subseção seguinte, apenas são apresentados quatro diferentes comportamentos de fluência e relaxação de tensões de laminados de fibras recicladas.

Já os ensaios de tração foram efetuados, também numa máquina universal da marca Shimadzu, modelo AGS-X, mas equipada com uma célula de carga de 100kN, auxiliada de um extensómetro para uma caracterização precisa dos diferentes laminados. A Figura 40 retrata um ensaio de tração de um dos provetes neste equipamento.

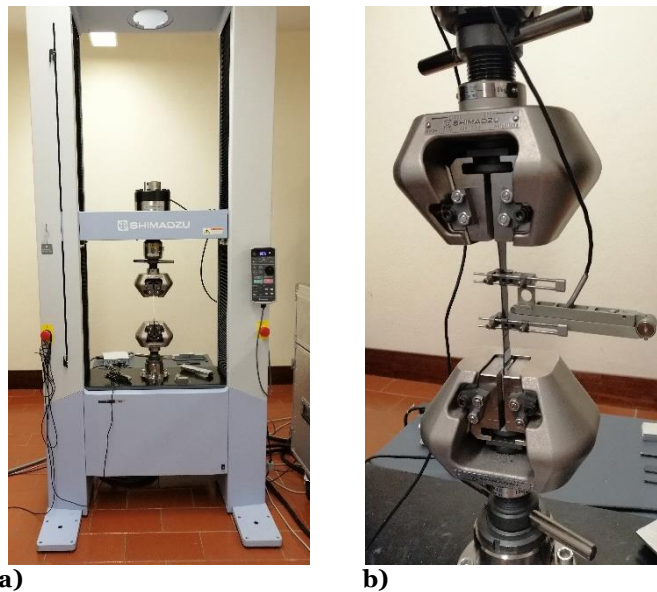


Figura 40 – a) Máquina de teste universal da marca Shimadzu, modelo AGS-X de célula de carga 100kN; b) Dispositivo de fixação para ensaio de tração e extensómetro.

Nestes ensaios a tensão foi calculada considerando a expressão abaixo descrita.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5)$$

Sendo o valor da área o da secção transversal do provete, dada por $A = b \times h$.

A rigidez dos provetes foi calculada através de regressão linear da Lei de Hooke, sempre com um fator de correlação superior a 95%.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (6)$$

As fotografias microscópicas que posteriormente serão apresentadas foram obtidas com recurso a um microscópio digital da marca Jiusion, com uma ampliação máxima de 1000x.

6.2 Análise e Discussão de Resultados

De modo a melhor compreender o comportamento mecânico dos materiais em questão, e como referido anteriormente, procedeu-se ao ensaio dos provetes à tração, em flexão em 3 pontos (F3P): dinâmicos e estáticos.

6.2.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração são comumente utilizados pela comunidade científica para obtenção de características mecânicas, mas também para o controlo de especificações e condições do material (Branco, 1994).

Na figura 41 é possível observar as curvas de tensão versus deformação (σ - ϵ) referente aos provetes do laminado de controlo. Pode-se verificar nesta figura a repetibilidade dos ensaios e que as curvas apresentam um comportamento em que é possível identificar um aumento linear da tensão de tração até ser atingida uma tensão máxima média de cerca de 378,84 ($\pm 14,21$) MPa, seguido da rotura do material. Quanto à rigidez do material, esta é cerca de 16,63 ($\pm 0,29$) GPa.

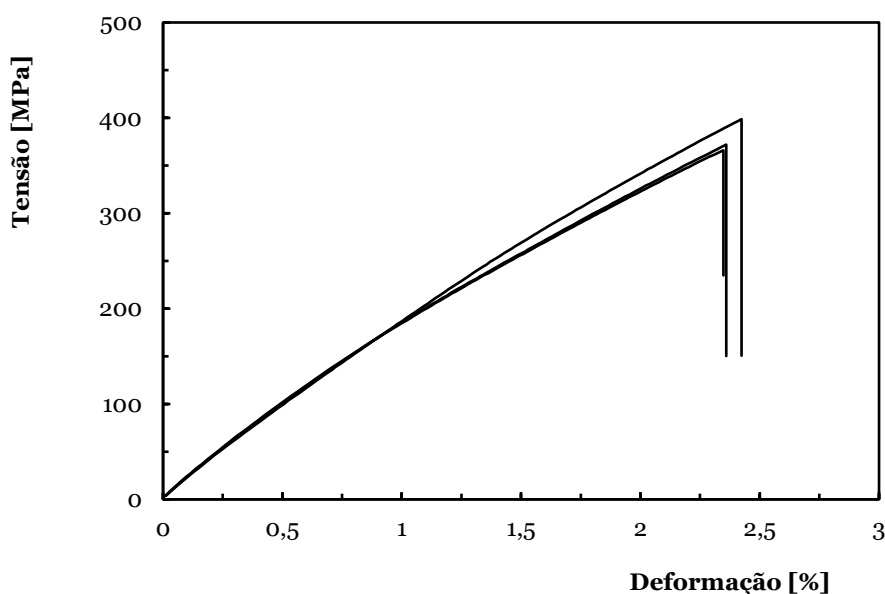


Figura 41 - Curvas de σ - ϵ do laminado de controlo em ensaio de tração.

A dispersão dos ensaios não é significativa, comprovando a sua repetibilidade, e o seu comportamento semelhante ao obtido por Eldaim, Mohmmmed & Seeahmed (2021) e Marikkannan et al. (2017).

Na Figura 42 apresenta-se uma fotografia microscópica da zona de rotura de um provete de controlo após o ensaio de tração. É observável que ocorreu a rotura da fibra de vidro nas

várias camadas do laminado e fratura da matriz. A deformação observável encontra-se dentro do expectável, considerando diversos estudos que abordam a caracterização mecânica de laminados com várias camadas de fibra de vidro em resinas termoplásticas (Eldaim, Mohmmed & Seeahmed, 2021; Bhat et al., 2019; Yang et al., 2000).

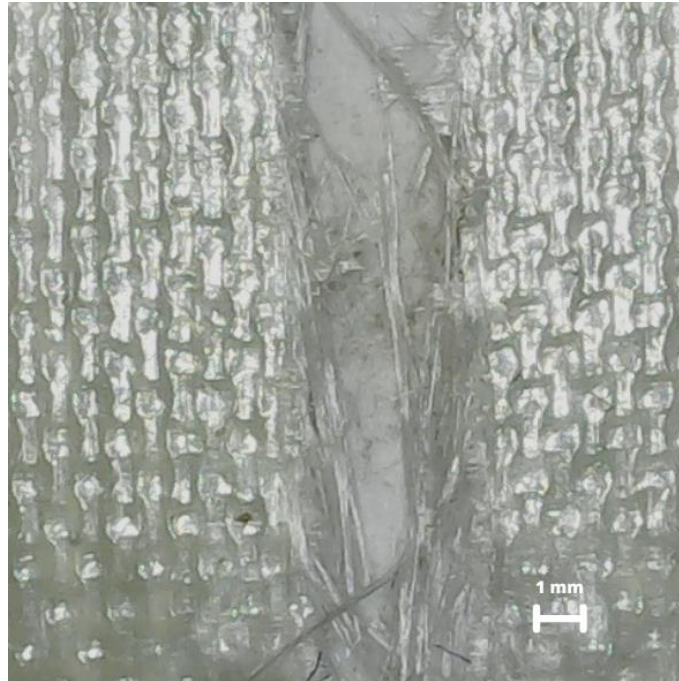


Figura 42 - Fotografia de um provete dos laminados de controlo após ensaio de tração.

Na Figura 43 é possível observar as curvas representativas de σ - ϵ dos ensaios de tração referentes aos laminados de fibras recuperadas a diferentes tempos de queima à temperatura de 400°C, em comparação com a curva representativa do laminado de controlo. Estas apresentaram bons resultados face ao controlo, visto que apenas houve uma perda de cerca de 30% da tensão máxima, atingindo um valor médio de 268,64 ($\pm 14,22$) MPa, e uma perda de cerca de 20% na rigidez, atingindo o valor de 13,23 ($\pm 0,78$) GPa, para os laminados que apresentam as melhores propriedades, os de fibras recuperadas após queima durante 15 minutos.

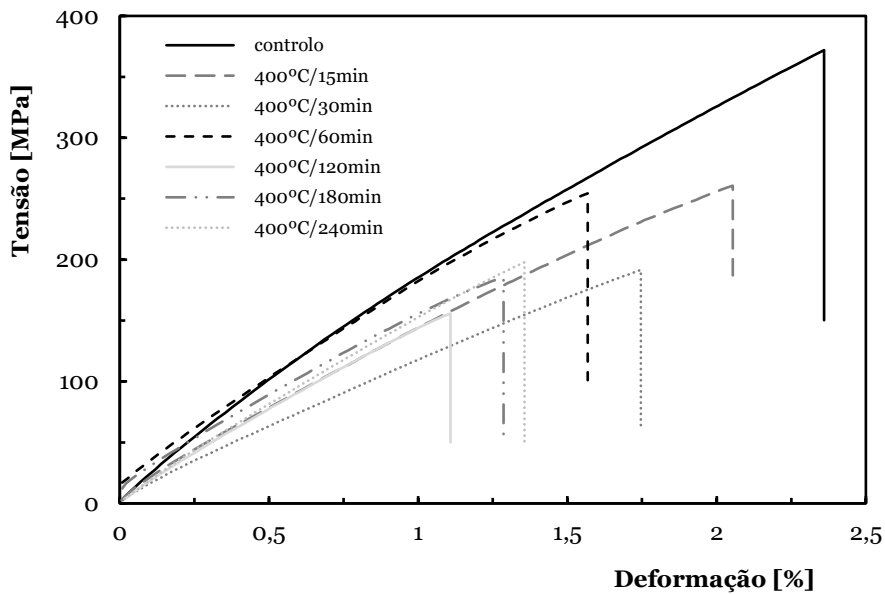
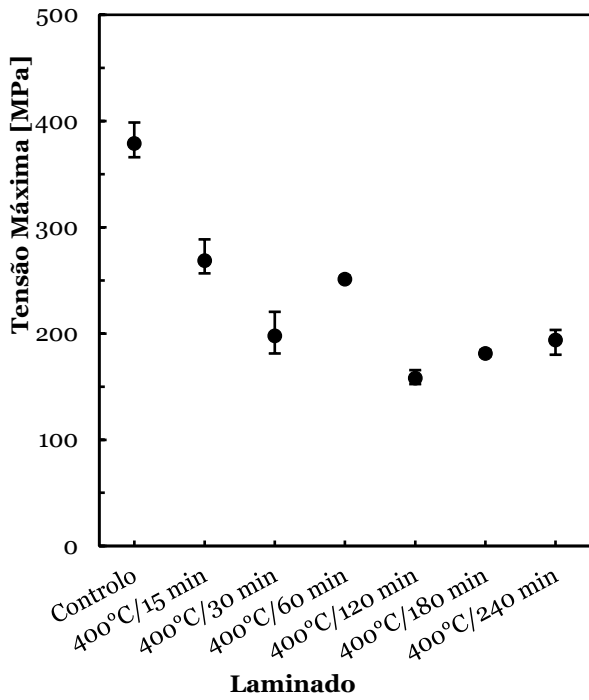


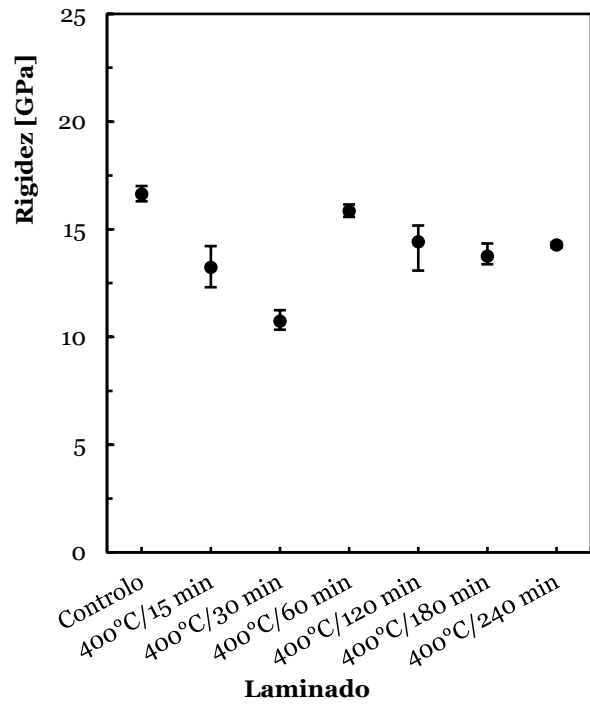
Figura 43 – Curvas representativas de σ - ϵ do ensaio de tração dos laminados de fibras recuperadas a 400°C com diferentes tempos de queima.

A Figura 44 resume as principais propriedades de flexão, obtidas a partir destas curvas, em termos de valores médios (símbolos) e respetivos valores máximos e mínimos (bandas de dispersão). É possível observar na Figura 44a), que os valores da tensão máxima obtidos nos laminados de fibras recuperadas após queimas de 15 e 60 minutos se destacam, sendo que o segundo se destaca ainda por apresentar uma rigidez (Figura 44b) de 15,85 (\pm 0,24) GPa, ou seja, apenas sofreu um decréscimo de cerca de 4,7% face ao laminado de controlo.

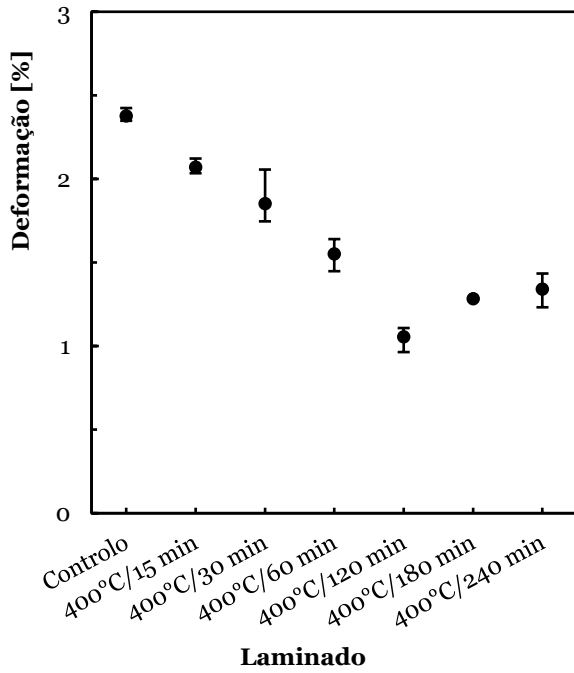
Tomando como referência o valor do laminado de controlo, com o aumento do tempo é possível observar que a deformação (Figura 44c) tem tendência a diminuir, exceto no caso dos tempos mais longos, de 180 e 240 minutos. O laminado de fibras recuperadas a uma temperatura de 400°C durante 15 minutos, destaca-se por ser o que apresenta as melhores características ao nível da tensão e rigidez, e é também o que apresenta os maiores valores de deformação, com 2,07%.



a)



b)



c)

Figura 44 - Propriedades obtidas nos ensaios de tração dos laminados de fibras recuperadas a 400°C com diferentes tempos de queima: a) tensão máxima; b) rigidez; c) deformação.

Apresenta-se na Figura 45 uma fotografia microscópica da zona de rotura de um provete do laminado de fibras recuperadas a 400°C durante um tempo de queima de 180 minutos,

após o ensaio de tração. É observável a rotura das fibras à tração nas diferentes camadas do laminado e a quebra da matriz.

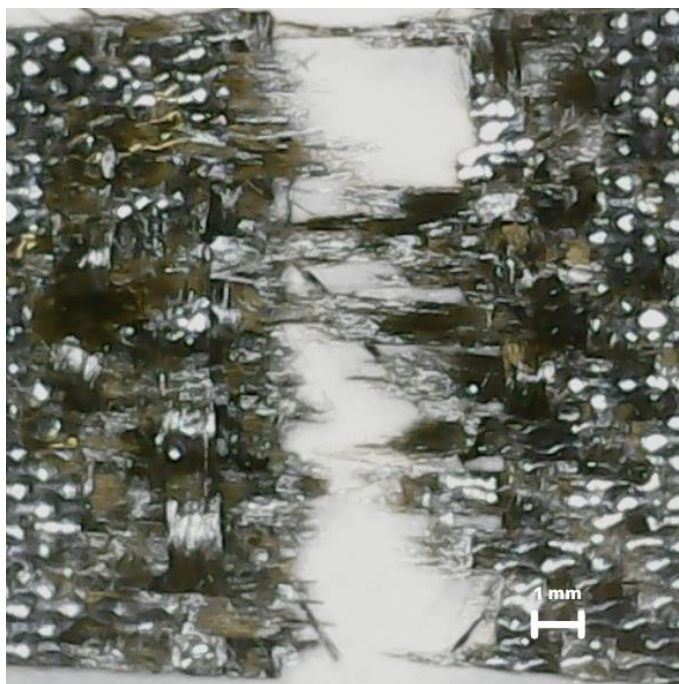


Figura 45 - Fotografia de um provete do laminado de fibras recuperadas a 400°C durante 180 minutos após ensaio de tração.

Na Figura 46 estão ilustradas as curvas de σ - ϵ representativas dos laminados de controlo e dos laminados das fibras recuperadas a 600°C a diferentes tempos de queima.

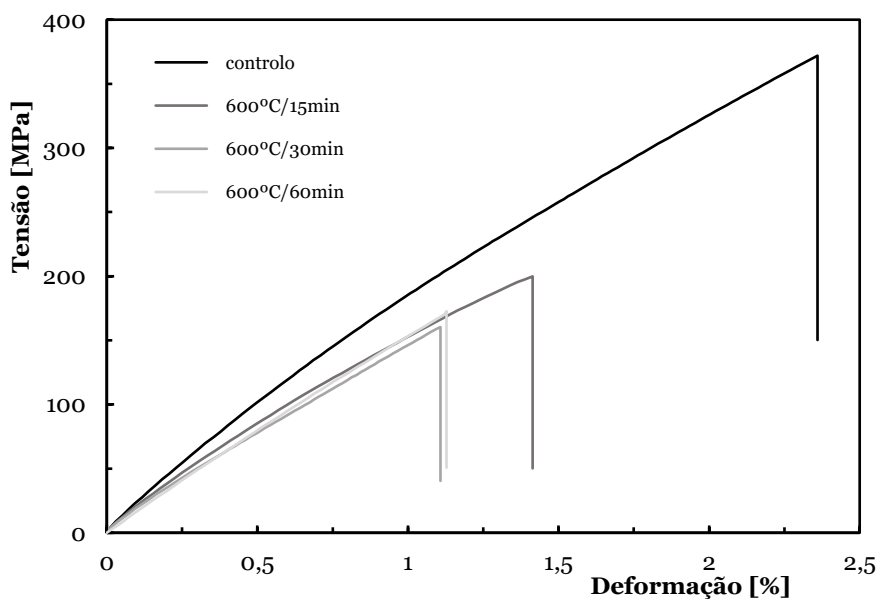
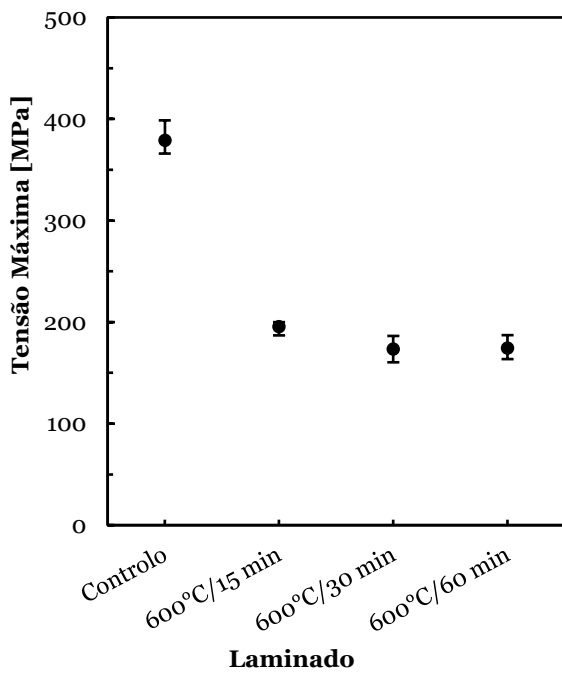


Figura 46 - Curvas representativas de σ - ϵ do ensaio de tração dos laminados de fibras recuperadas a 600°C com diferentes tempos de queima.

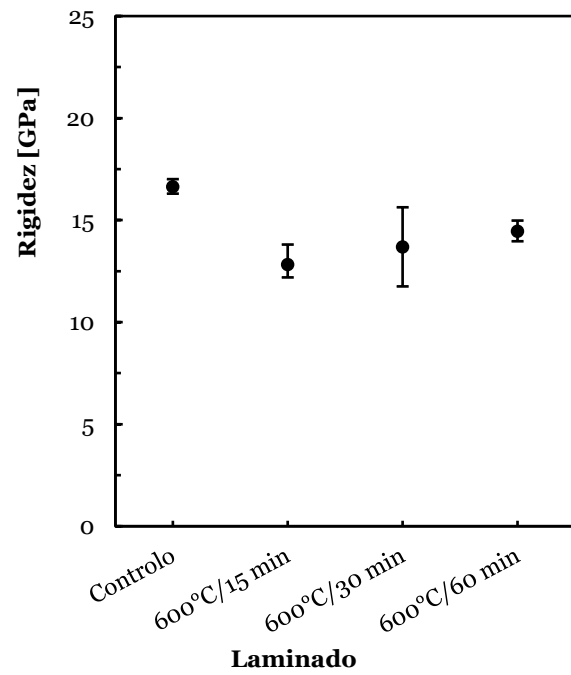
No caso das tensões máximas atingidas pelos laminados de fibras recuperadas, o melhor valor, referente aos 15min de queima, com um valor médio de cerca de 195 MPa, representa uma diminuição de cerca de 48% face à tensão média de controlo.

As características associadas a estes laminados apresentam variações muito pequenas entre os diferentes tempos de queima, conforme é possível verificar na Figura 47, sendo que tanto para os tempos de queima de 30 como de 60 minutos, houve uma variação de cerca de 54% face à tensão do laminado do controlo (Figura 47a). Quanto à rigidez dos laminados (Figura 47b), esta aumenta com o aumento do tempo de queima das fibras, sendo que o laminado das fibras recuperadas após 60 minutos apresenta uma rigidez de 14,45 ($\pm 0,41$) GPa, que representa uma redução de 23% face ao laminado de controlo.

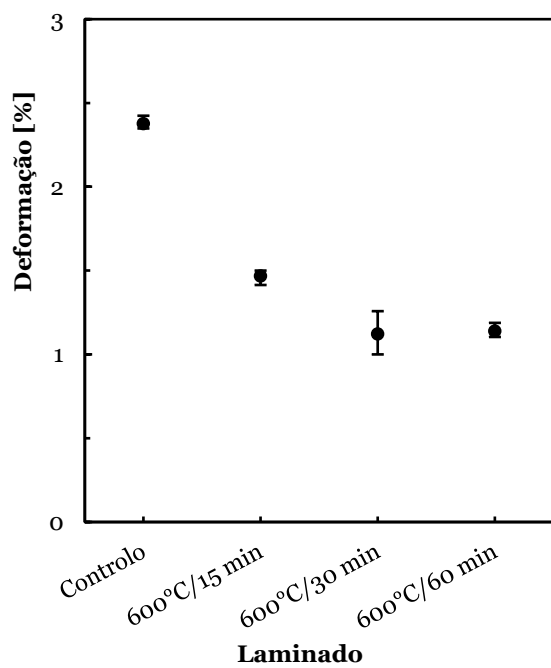
A Figura 48 apresenta uma fotografia microscópica da zona de rotura de um provete do laminado de fibras recuperadas a 600°C durante 30 minutos, após ensaio de tração. É possível verificar a ocorrência da rotura das fibras à tração e quebra na matriz. Ocorreu uma falha bastante semelhante ao laminado de fibras recuperadas a 400 °C.



a)



b)



c)

Figura 47 - Propriedades obtidas nos ensaios de tração dos laminados de fibras recuperadas a 600°C com diferentes tempos de queima: a) tensão máxima; b) rigidez; c) deformação.



Figura 48 – Fotografia de um provete do laminado de fibras recuperadas a 600°C durante 30 minutos após ensaio de tração.

No que diz respeito aos laminados de fibras recuperadas a 800°C, é possível observar na Figura 49 que estes apresentaram tensões máximas bastante inferiores à de controlo.

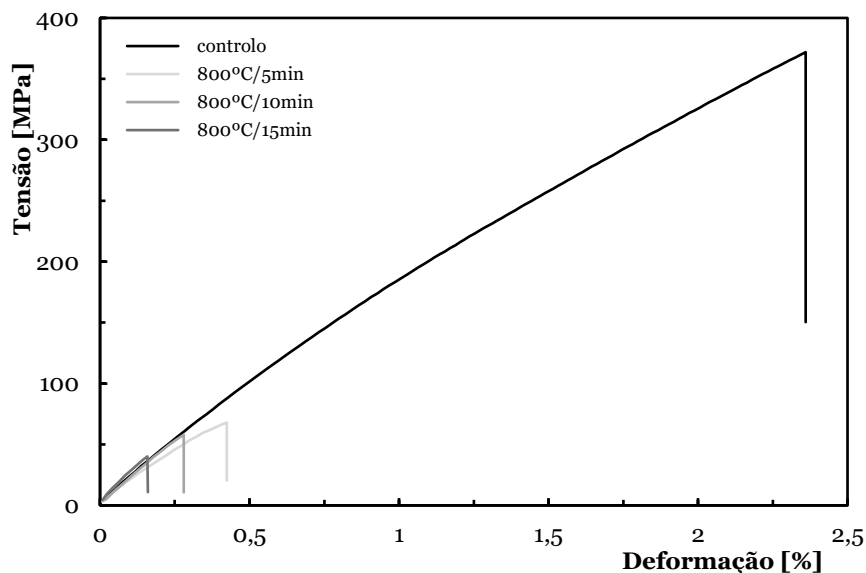


Figura 49 - Curvas representativas de σ - ϵ do ensaio de tração dos laminados de fibras recuperadas a 800°C com diferentes tempos de queima.

Os gráficos da Figura 50 confirmam que os valores obtidos das fibras recuperadas a 800°C apresentam valores muito abaixo, em comparação com os de controlo, havendo uma redução de mais de 80% da tensão máxima alcançada nos 3 laminados, sendo que a que

apresentou o melhor desempenho, foi o laminado reciclado durante 5min, apenas apresenta uma tensão máxima de 69,05 ($\pm 3,01$) MPa (Figura 50a). Os restantes laminados apresentaram uma rigidez (Figura 50b)) superior à de controlo, atingindo um valor de 21,55 ($\pm 2,40$) MPa com os laminados das fibras recuperadas durante 15 minutos, e, conseqüentemente, uma deformação (Figura 50c) abaixo dos 0,3%. Isto deve-se à baixa ductilidade dos materiais em questão.

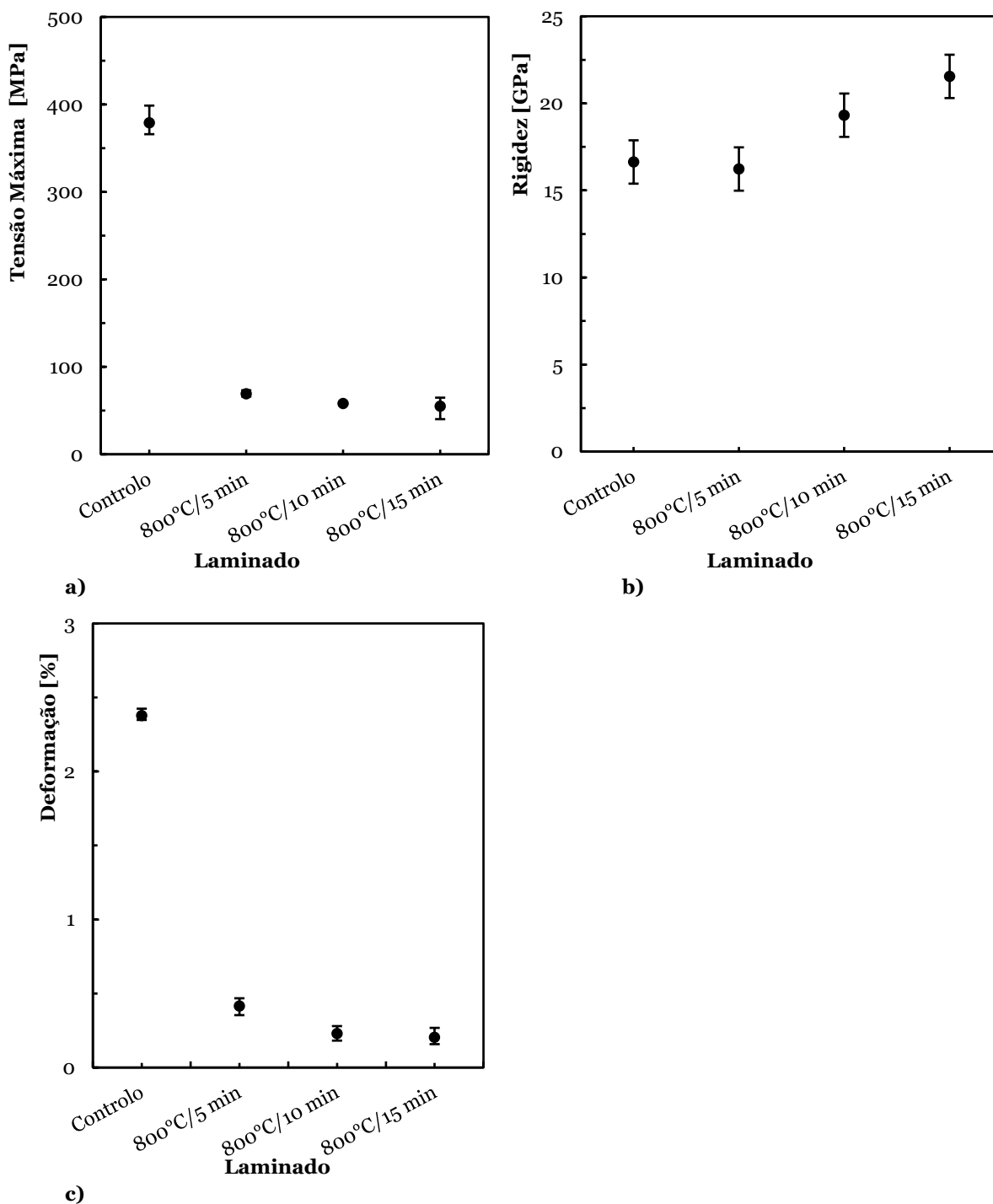


Figura 50 - Propriedades obtidas nos ensaios de tração dos laminados de fibras recuperadas a 800°C com diferentes tempos de queima: a) tensão máxima; b) rigidez; c) deformação.

Na Figura 51, laminados de fibras recuperadas a 800°C durante 10 minutos, ao contrário dos restantes laminados caracterizados à tração, pode-se concluir que se trata de uma fratura bastante frágil, apresentando um modo de dano muito diferente dos restantes materiais, que apresentam fraturas dúcteis.

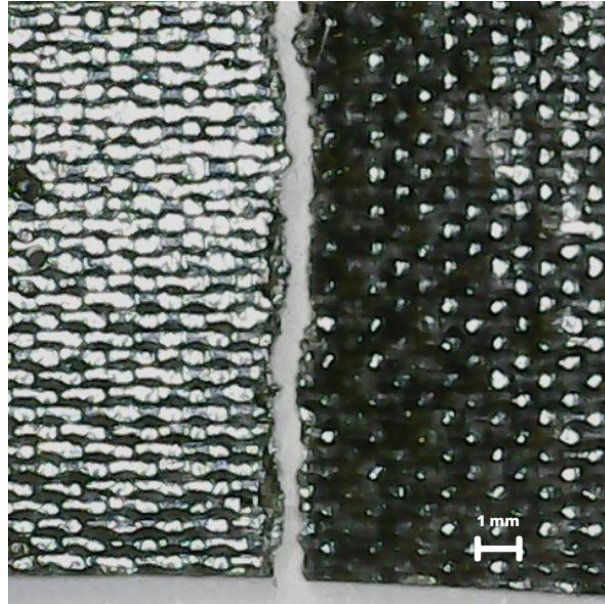


Figura 51 – Fotografia de um provete do laminado de fibras recuperadas a 800°C durante 10 minutos após ensaio de tração.

6.2.2 Ensaios de Flexão em 3 Pontos

Na figura 52 é possível observar a curva σ - ϵ referente aos ensaios dos provetes de controlo em F3P, à velocidade de 2mm/min.

Pode-se verificar a repetibilidade dos ensaios, de igual modo aos de tração, e que as curvas apresentam um comportamento em que é possível identificar um aumento linear da tensão de flexão no domínio elástico, como expectável segundo o reportado por Marikkannan et al. (2017), Demircan, Özen & Kisa (2020) e Monjon et al. (2022), até ser atingida uma tensão máxima média de cerca de 560 ($\pm 20,18$) MPa, sendo observável que, mais uma vez, a dispersão dos ensaios não é significativa.

Os valores de tensão no ensaio de F3P são superiores aos observados na Figura 40. Isto deve-se à direção de aplicação da carga: enquanto nos ensaios de tração o esforço ocorre na direção da fibra, perpendicularmente à secção transversal do provete, no caso dos ensaios de F3P esta ocorre na direção perpendicular ao próprio provete (Marikkannan et al., 2017).

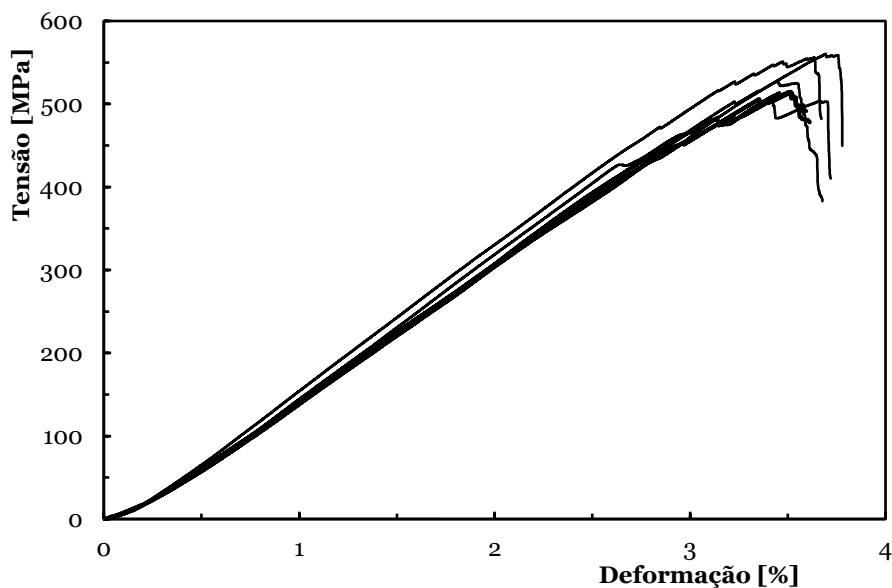


Figura 52 – Curvas de σ - ϵ do laminado de controlo em teste de F3P a uma velocidade de 2mm/min.

A aparência de “zigzague” que algumas curvas apresentam, e que também se irá verificar nos restantes ensaios de F3P, deve-se principalmente à quebra de fibras e de delaminações que ocorrem nos provetes antes de ser atingida a tensão máxima, devido ao seu método de fabrico.

Na Figura 53 apresenta-se uma fotografia de um provete do laminado de controlo, onde é possível observar que, ainda que pouco nítida, a fratura ocorreu principalmente ao nível da matriz.

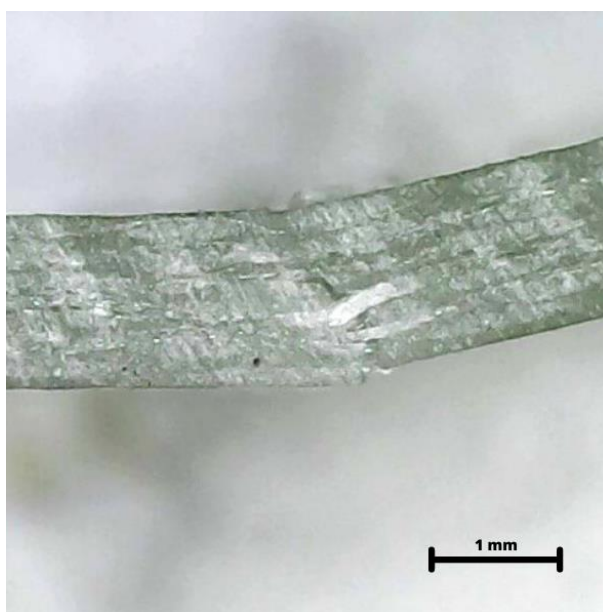


Figura 53 – Fotografia de um provete do laminado de controlo após ensaio de F3P à velocidade de 2mm/min.

Na Figura 54 apresentam-se as curvas representativas de σ - ϵ correspondentes aos laminados produzidos com as fibras recuperadas a 400°C em diferentes tempos de queima.

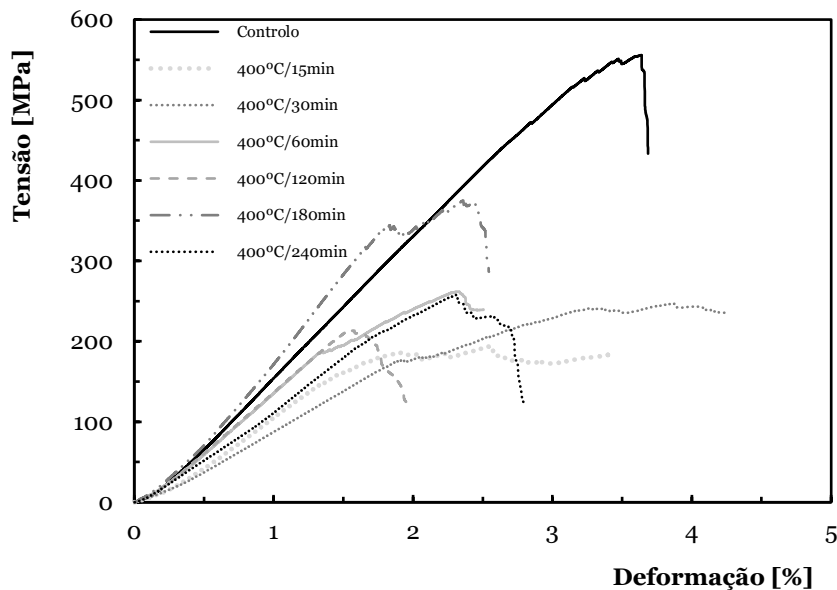


Figura 54 – Curvas representativas de σ - ϵ do ensaio de F3P dos laminados de fibras recuperadas a 400°C em diferentes tempos de queima à velocidade de 2mm/min.

O laminado das fibras recuperadas durante 180 minutos destaca-se claramente dos restantes, apresentando uma tensão máxima de 376,24 (\pm 9,78) MPa.

Na Figura 55 são apresentados os gráficos resumo das propriedades analisadas. Ao nível da tensão e rigidez, as fibras queimadas durante 180 minutos destacam-se pelas suas propriedades por apresentarem uma perda de apenas cerca de 34%, no que diz respeito à tensão máxima atingida no ensaio à velocidade de 2mm/min e por haver um aumento de cerca de 2% da rigidez, apresentando um valor de 18,34 (\pm 1,75) GPa.

O laminado das fibras recuperadas após queima durante 30 minutos, ainda que não se destaque pela sua rigidez (Figura 55b), é aquele que apresenta a maior ductilidade visto que sofreu uma deformação superior à do laminado de controlo, atingindo 3,87% (Figura 55c), ainda que apenas apresente a segunda maior tensão verificada nos laminados de fibras recicladas, sofrendo apenas uma redução de cerca de 50% da tensão de controlo, com um valor de 286 (\pm 39,69) MPa (Figura 55a).

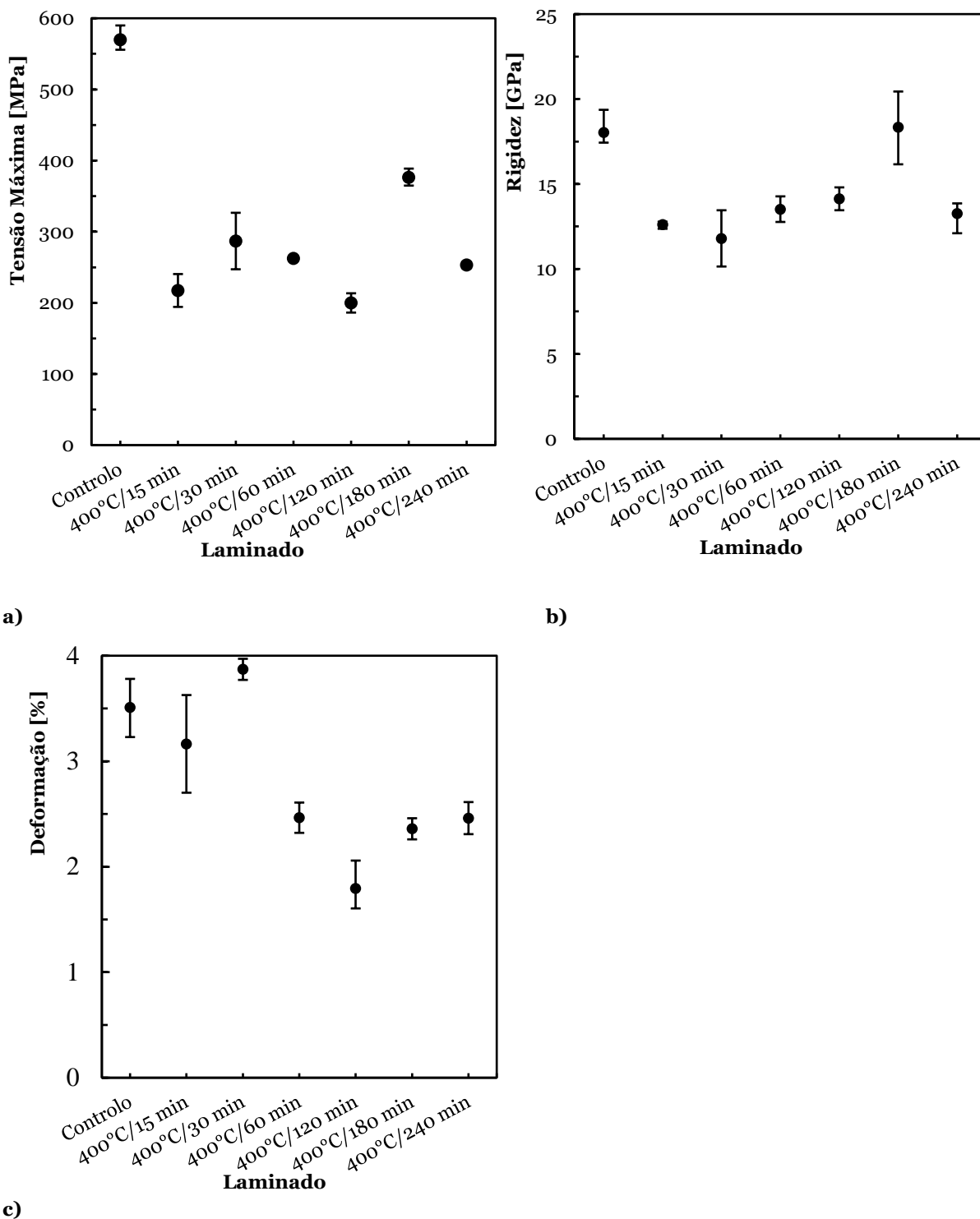


Figura 55 – Propriedades obtidas nos ensaios de F3P dos laminados de fibras recuperadas a 400°C em diferentes tempos de queima: a) Tensão de flexão; b) Rigidez de flexão; c) Deformação de flexão.

Na Figura 56 apresenta-se uma fotografia microscópica de uma falha na matriz ao longo da seção do provete de laminado de fibras recuperadas a 400°C durante 120 minutos ensaiado à velocidade de 0,02mm/min. A irregularidade da falha pode ser justificada pela elevada rigidez que se traduz numa baixa deformação máxima do material.

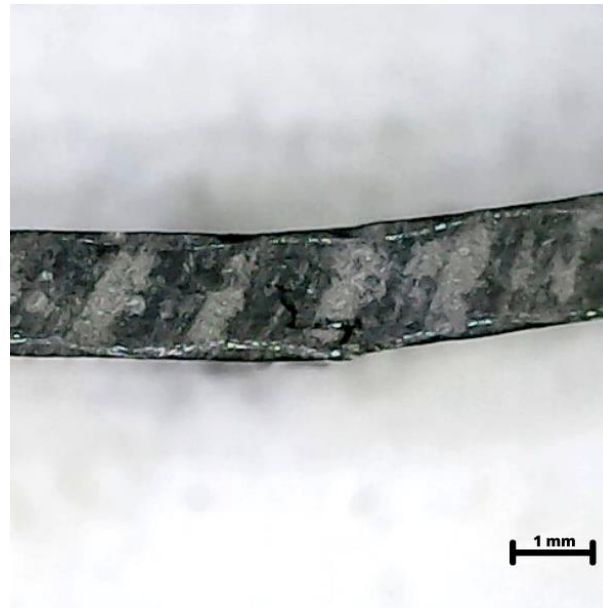


Figura 56 – Fotografia de um provete do laminado de fibras recuperadas a 400°C durante 120 minutos após ensaio de F3P à velocidade de 0,02mm/min.

No que diz respeito aos laminados resultantes das fibras recicladas à temperatura de 600°C, na Figura 57 são observáveis as curvas de σ - ϵ associadas aos ensaios de F3P, à velocidade de 2mm/min.

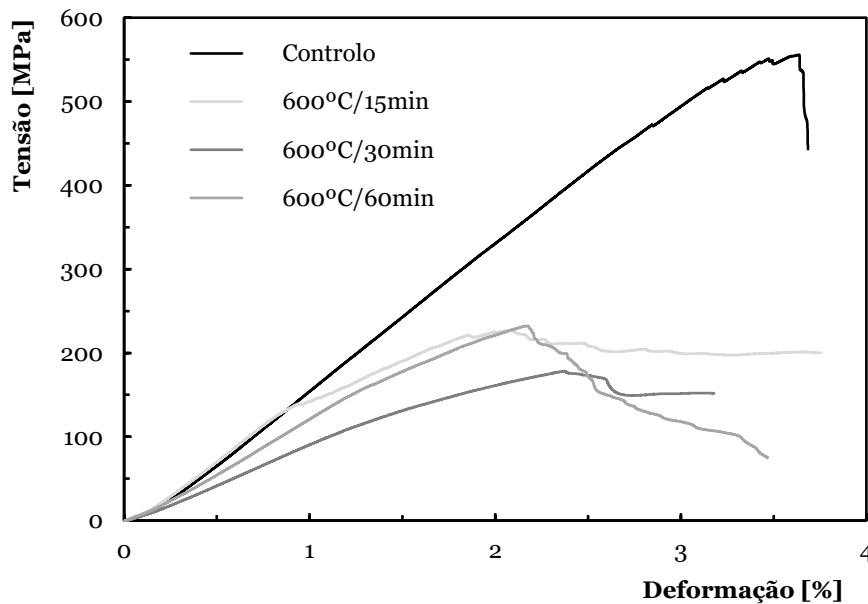


Figura 57 – Curvas representativas de σ - ϵ do ensaio de F3P das diversas combinações para 600°C à velocidade de 2mm/min.

Os laminados recuperados durante 15 e 60min apresentam as melhores características, com tensões máximas de 228,14 (\pm 5,17) e 239,98 (\pm 5,62) MPa, respetivamente. Como confirmado pelos gráficos da Figura 58 os laminados sujeitos à temperatura de 600°C durante 15 e 60 minutos apresentaram características muito semelhantes, no entanto, o

laminado das fibras sujeitas a uma queima durante 30 minutos destaca-se pela negativa. Este apresenta valores de tensão (Figura 58a) e de rigidez (Figura 58b) inferiores, representando uma queda de cerca de 68% face à tensão máxima do laminado de controlo, traduzindo-se numa tensão máxima de $185,26 (\pm 39,69)$ MPa, e uma deformação (Figura 58c) superior aos restantes laminados de fibras recicladas a 600°C, com 2,57%.

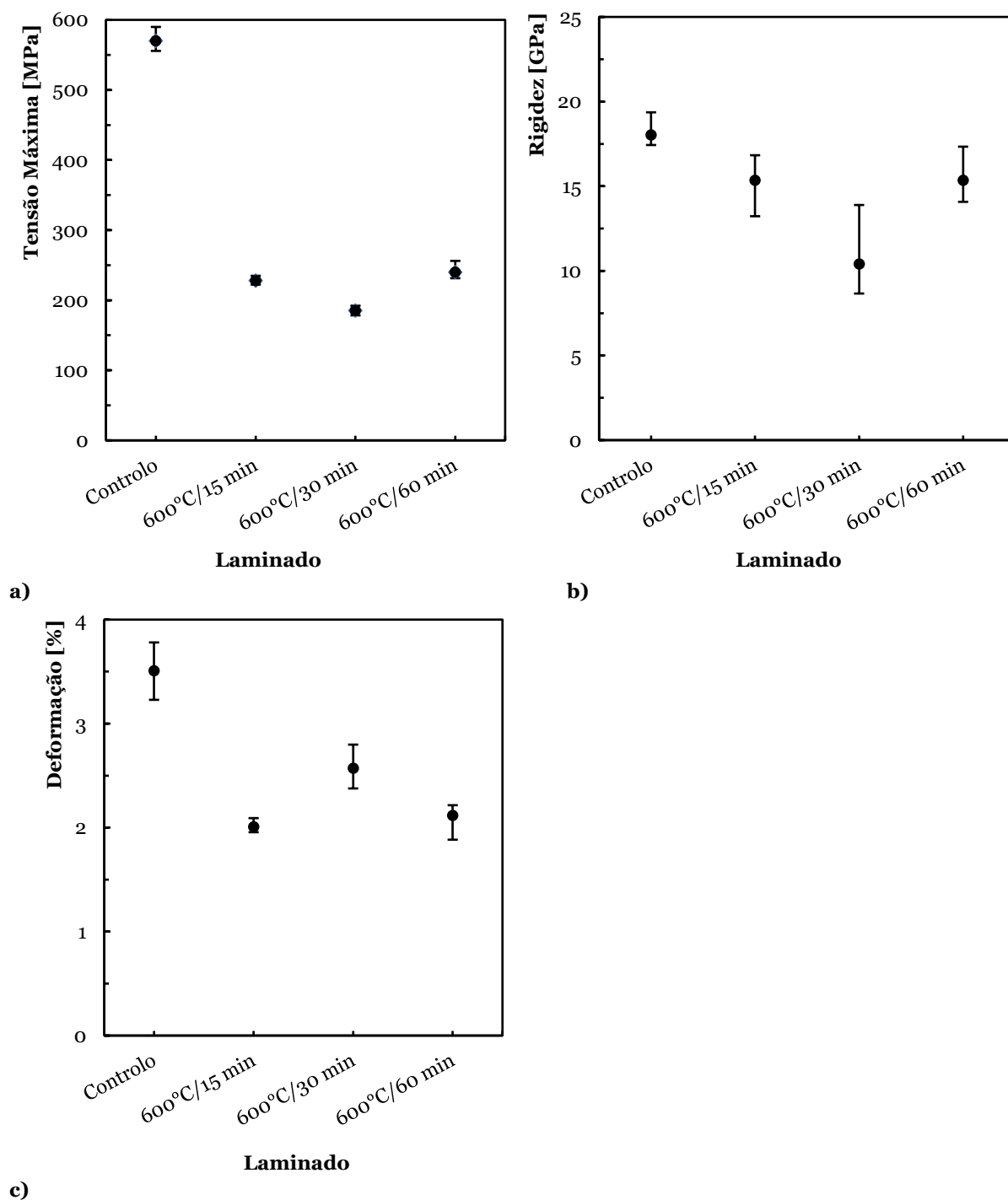


Figura 58 – Propriedades obtidas nos ensaios de F3P dos laminados de fibras recuperadas a 600°C com diferentes tempos de queima: a) Tensão de flexão; b) Rigidez de flexão; c) Deformação de flexão.

Na Figura 59 apresenta-se uma imagem microscópica dos laminados de fibras recuperadas a 600°C durante 60 minutos após o ensaio de F3P à velocidade de 0,02mm/min que captou uma falha da matriz, sendo de notar que algumas das fibras apresentaram efeitos de tração, ainda que não tenham sofrido quebra total.

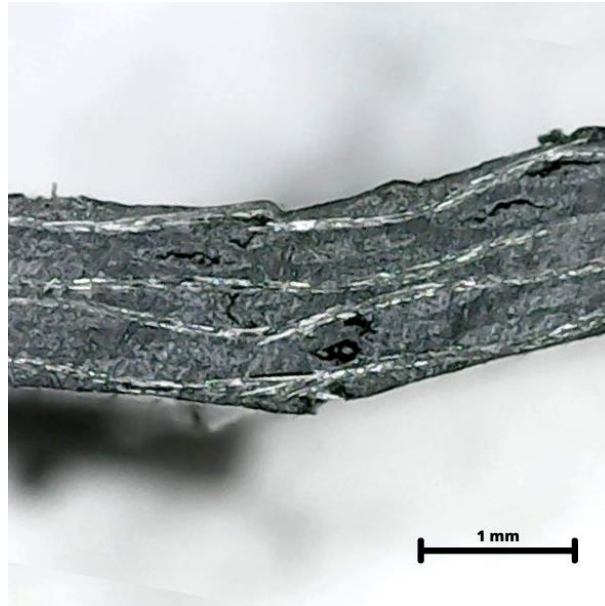


Figura 59 –Fotografia de um provete do laminado de fibras recuperadas a 600°C durante 60 minutos após ensaio de F3P à velocidade de 0,02mm/min.

No que diz respeito aos laminados das fibras recicladas à temperatura de 800°C, na Figura 60 é observável que estes apresentaram tensões bastante inferiores, que se traduziu numa perda cerca de 82% da tensão máxima face à do laminado de controlo, tendo atingindo um valor máximo de 103,72 (\pm 6,06) MPa com o laminado das fibras recuperadas durante 10 minutos.

Esta baixa qualidade dos laminados, confirmada também pelos gráficos da Figura 58, deve-se principalmente à temperatura excessiva associada ao processo de recuperação das fibras, que resulta numa degradação excessiva das mesmas que acaba por prejudicar o desempenho do compósito, como foi observável também no caso dos ensaios de tração.

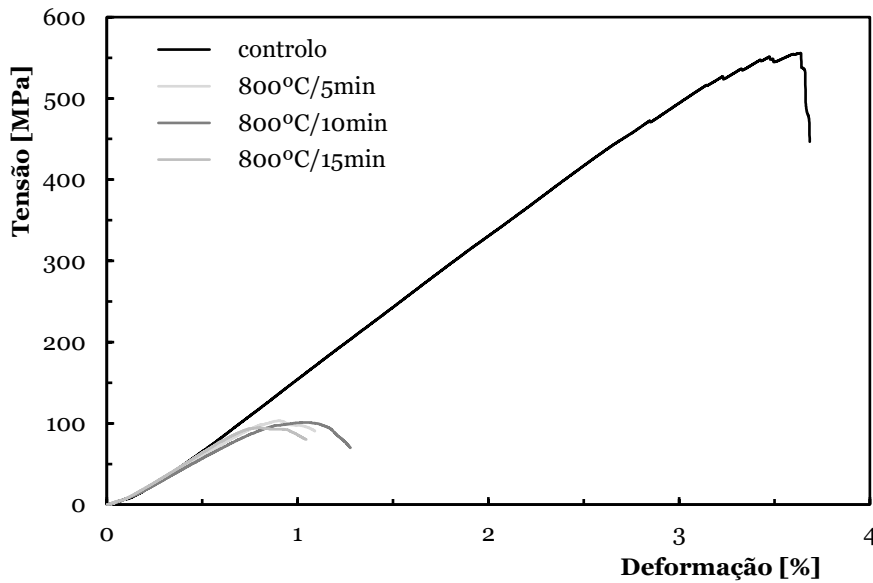


Figura 60 – Curvas representativas de σ - ϵ do ensaio de F3P dos laminados de fibras recuperadas a 800°C com diferentes tempos de queima à velocidade de 2mm/min.

Na Figura 61 é possível observar que a rigidez (Figura 61b) associada aos laminados das fibras recuperadas a 800°C não apresentou uma variação significativa, aumentando ligeiramente com o aumento do tempo de queima associado, atingindo o valor máximo de 13,75 ($\pm 0,22$) GPa, assim como a variação na deformação (Figura 61c) dos 3 laminados pois esta diminui com o aumento do tempo de queima, atingindo um valor mínimo de 0,88%.

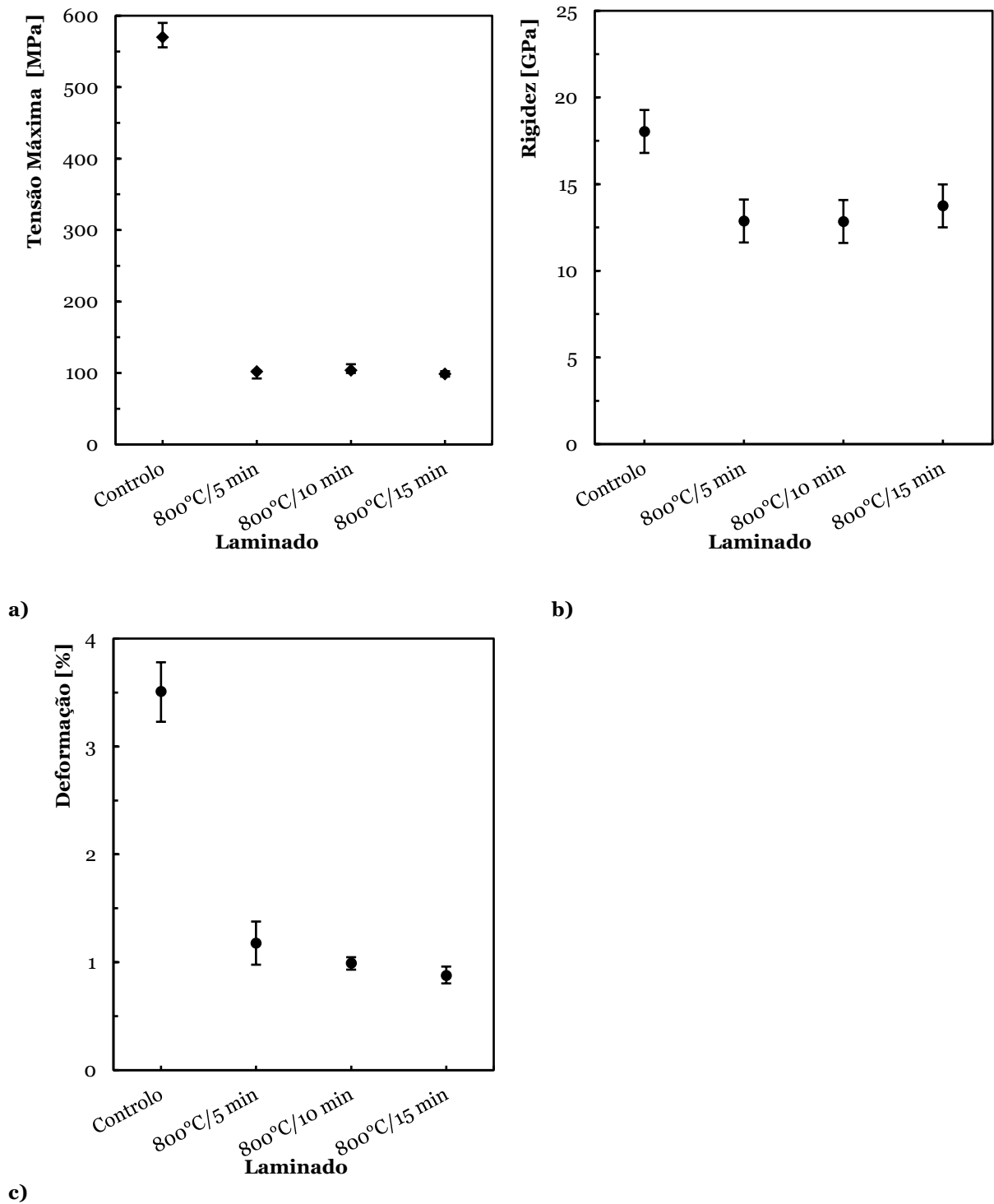


Figura 61 – Propriedades obtidas nos ensaios de F3P dos laminados de fibras recuperadas a 600°C com diferentes tempos de queima: a) Tensão de flexão; b) Rigidez de flexão; c) Deformação de flexão.

Na Figura 62 apresenta-se uma fotografia microscópica de um laminado de fibras recuperadas a 800°C durante 10 minutos após um ensaio de F3P à velocidade de 200mm/min. Em comparação com as outras imagens obtidas, Figuras 56 e 59, a falha contemplada nesta representa uma fratura mais considerável da matriz, com indícios de tração nas fibras da face de baixo, representando um modo de falha dúctil como os

anteriores. Este modo de falha está alinhado com o que é reportado na literatura, visto que, ainda que apresente deformação na face comprimida, é na face tracionada que ocorre a falha (Yang et al., 2000).

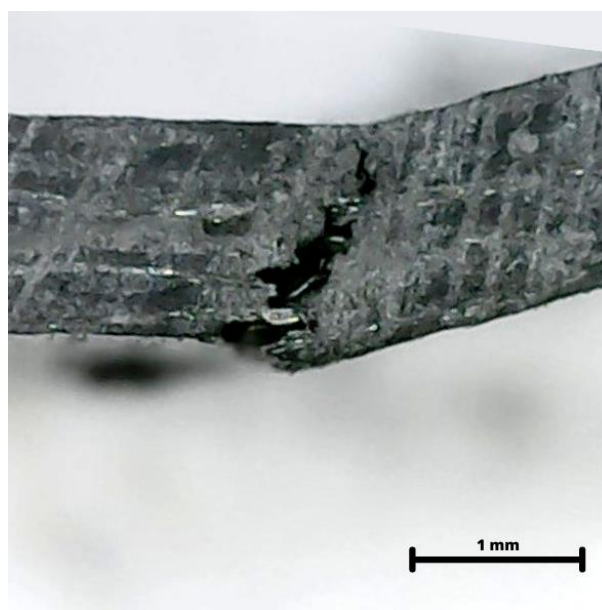


Figura 62 – Fotografia de um provete do laminado de fibras recuperadas a 800°C durante 10 minutos após ensaio de F3P à velocidade de 200mm/min.

Na Tabela 10 é possível observar um resumo das tensões atingidas por cada laminado, assim como a sua variação percentual face ao laminado de controlo.

Tabela 10 – Variação da tensão nos ensaios de F3P e tração.

Material	Tensão de F3P [MPa]	Variação face ao controlo [%]	Tensão de tração [MPa]	Variação face ao controlo [%]
Controlo	569,9	-	378,84	-
400°C/15 min	217,42	- 61,85	268,63	- 29,09
400°C/30 min	286,93	- 49,65	197,71	- 47,81
400°C/60 min	262,52	- 53,94	251,00	- 33,75
400°C/120 min	199,91	- 64,92	157,91	- 58,32
400°C/180 min	376,24	- 33,98	181,32	- 52,14
400°C/240 min	253,20	- 55,57	193,75	- 48,86
600°C/15 min	228,14	- 59,97	195,44	- 48,41
600°C/30 min	185,26	- 67,49	173,37	- 54,24
600°C/60 min	239,98	- 57,89	174,50	- 53,94
800°C/5 min	101,70	- 82,15	69,05	- 81,77
800°C/10 min	103,72	- 81,80	58,12	- 84,66
800°C/15 min	98,73	- 82,68	54,87	- 85,52

Na Figura 63 é representado o gráfico do laminado de controlo que representa diferentes taxas de deformação associadas e como estas influenciam as curvas de σ - ϵ . Tal como reportado no estudo realizado por Demircan, Özen & Kisa (2020), quando ocorre um aumento da taxa de deformação, é possível observar um aumento da tensão.

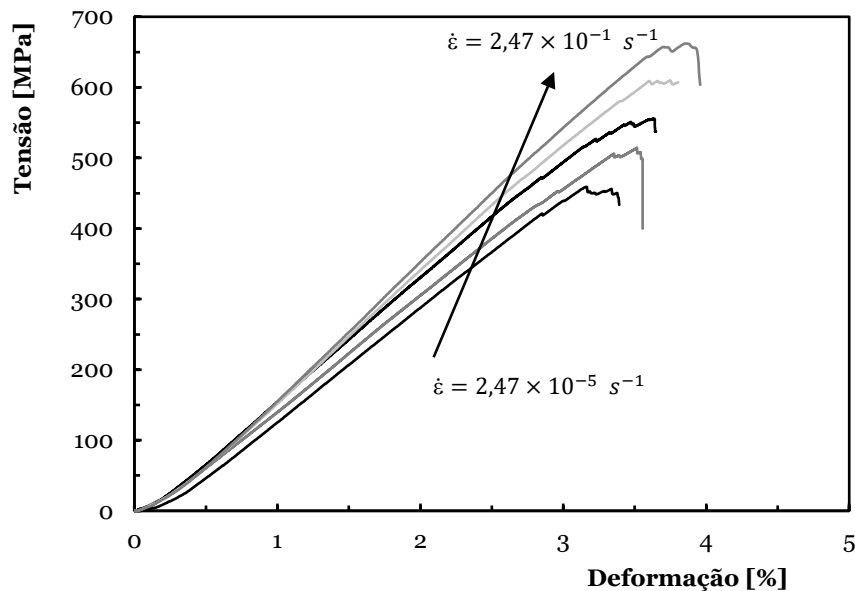


Figura 63 - Curva σ - ϵ representativas para laminado de controlo para as diferentes taxas de deformação.

Nas Figuras 64, 65 e 66 é possível observar uma nítida tendência comum de aumento dos valores em todos os laminados quando se aumentou a velocidade de ensaio, ou seja, quando se aumentou o logaritmo da taxa de deformação. Esta linearidade permite prever o comportamento do material, no que diz respeito às suas características, face a alterações na taxa de deformação.

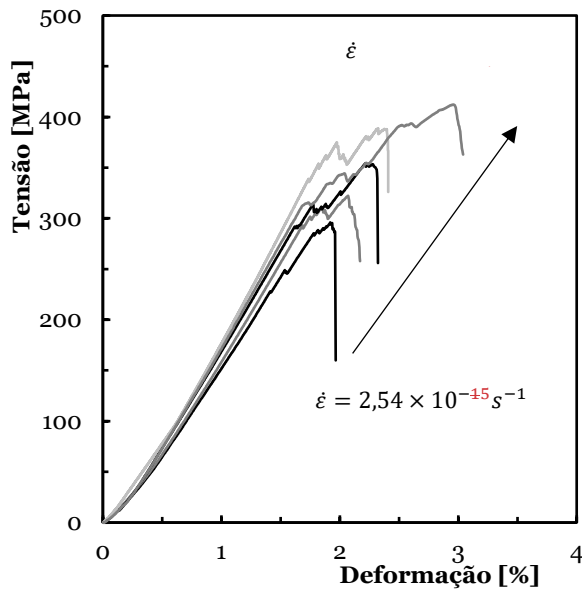
Na Figura 64a) apresentam-se as curvas representativas do laminado que apresentou as melhores características para uma reciclagem a uma temperatura de 400°C, após 180 minutos de tempo de queima, sendo possível observar que existe uma tendência de crescimento da tensão máxima atingida com o aumento da taxa de deformação, semelhante à observada no laminado de controlo. Considerando a tensão para a taxa de deformação $2,54 \times 10^{-5} s^{-1}$, 318,65 MPa, e a tensão para a taxa de deformação $2,54 \times 10^{-4} s^{-1}$, 415,33 MPa, é possível observar que houve um crescimento de cerca de 30%.

Na Figura 64b), observa-se a evolução da tensão com o logaritmo da taxa de deformação, esta tendência torna-se ainda mais evidente, sendo que, dos 6 materiais testados, o laminado de fibras recuperadas durante 180 minutos foi o que apresentou uma maior semelhança ao comportamento do laminado de controlo. Este comportamento traduz-se

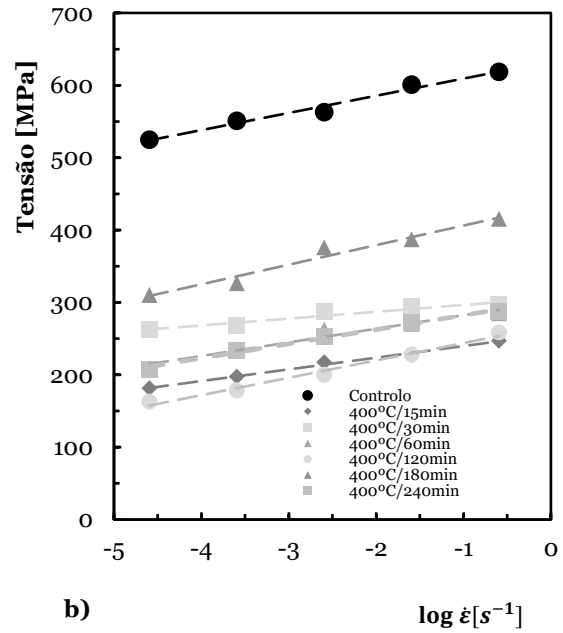
numa tendência linear paralela, sendo que a diminuição face ao laminado de controlo foi de cerca de 1,8 vezes.

Na Figura 64c), pode-se observar as linhas de tendência da rigidez em função do logaritmo da taxa de deformação. Mais uma vez, o laminado das fibras recuperadas durante 180 minutos, para taxas de deformação baixas, destacou-se por apresentar valores de rigidez superiores aos valores do laminado de controlo.

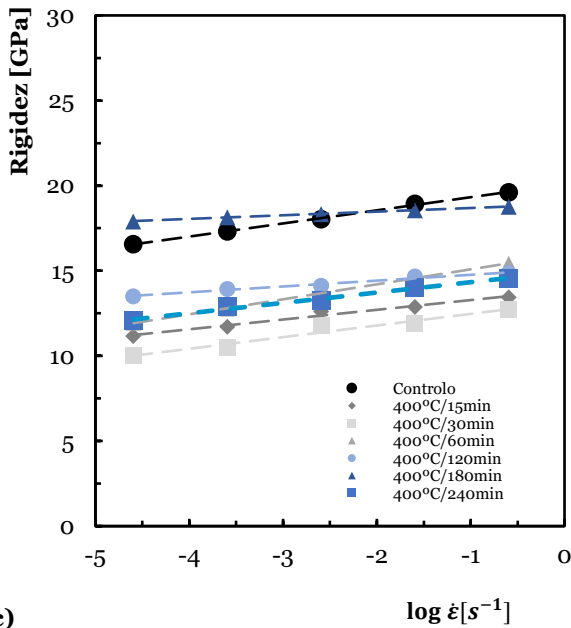
Na Figura 64d), apresentam-se as linhas de tendência dos vários laminados para o efeito do logaritmo da taxa de deformação na deformação sofrida pelos laminados. O laminado das fibras recuperadas durante 180 minutos apresentou uma deformação, ainda que mais baixa que a de controlo, paralela a esta. Aqui destaca-se também o laminado de fibra recuperada durante 30 minutos, pois apresenta uma deformação superior ao laminado de controlo em praticamente toda a variação de taxa de deformação considerada.



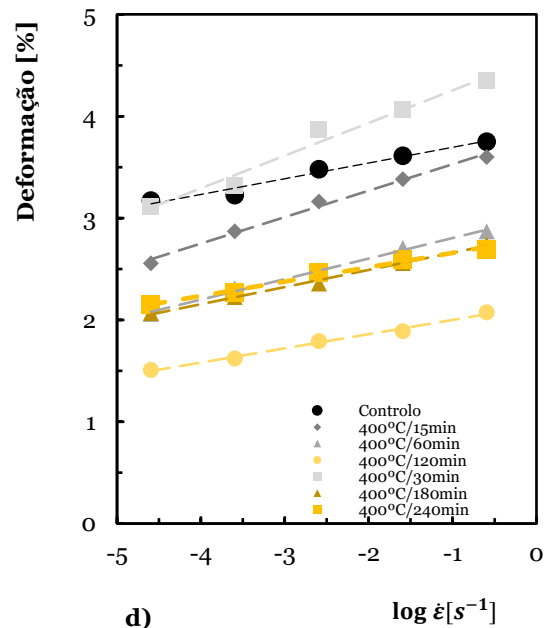
a)



b)



c)



d)

Figura 64 – a) Curvas σ - ϵ representativas para laminado de fibras recuperadas a 400°C durante 180 minutos para as diferentes taxas de deformação; Efeito da taxa de deformação: b) Tensão de flexão; c) Rigidez de flexão; d) Deformação de flexão.

Na Figura 65a) apresentam-se as curvas representativas do laminado que apresentou as melhores características para uma reciclagem a 600°C, o das fibras recuperadas após 60 minutos de tempo de queima, sendo possível observar que existe uma tendência de crescimento da tensão máxima atingida com o aumento da taxa de deformação, semelhante à observada no laminado de controlo. Considerando a tensão para a taxa de deformação $2,55 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 220,19 MPa, e a tensão para a taxa de deformação $2,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 256,36 MPa, é possível observar que houve um crescimento de cerca de 16%.

Na Figura 65b), mostra a evolução da tensão com o logaritmo da taxa de deformação, esta tendência torna-se ainda mais evidente, sendo que o laminado de fibras recuperadas durante 30 minutos foi o que apresentou uma maior semelhança ao comportamento do laminado de controlo, ainda que o que apresente as melhores características seja o laminado de fibras recuperadas durante 60 minutos. Ainda assim, é notável que houve uma descida considerável dos valores da tensão.

Na Figura 65c), pode-se observar as linhas de tendência da rigidez em função do logaritmo da taxa de deformação. Mais uma vez, o laminado das fibras recuperadas durante 60 minutos destacou-se por apresentar os melhores valores de rigidez, dos três laminados de fibras recicladas a 600°C.

Na Figura 65d), apresentam-se as linhas de tendência dos vários laminados para o efeito do logaritmo da taxa de deformação na deformação sofrida pelos laminados, o laminado das fibras recuperadas durante 30 minutos apresentou uma deformação, ainda que mais baixa que a de controlo, paralela a ele.

Assim como nas Figuras 65b), 65c) e 65d) a descida de valores também é considerável, indicando uma maior degradação de valores, face ao controlo e aos laminados de fibras recicladas a 400°C.

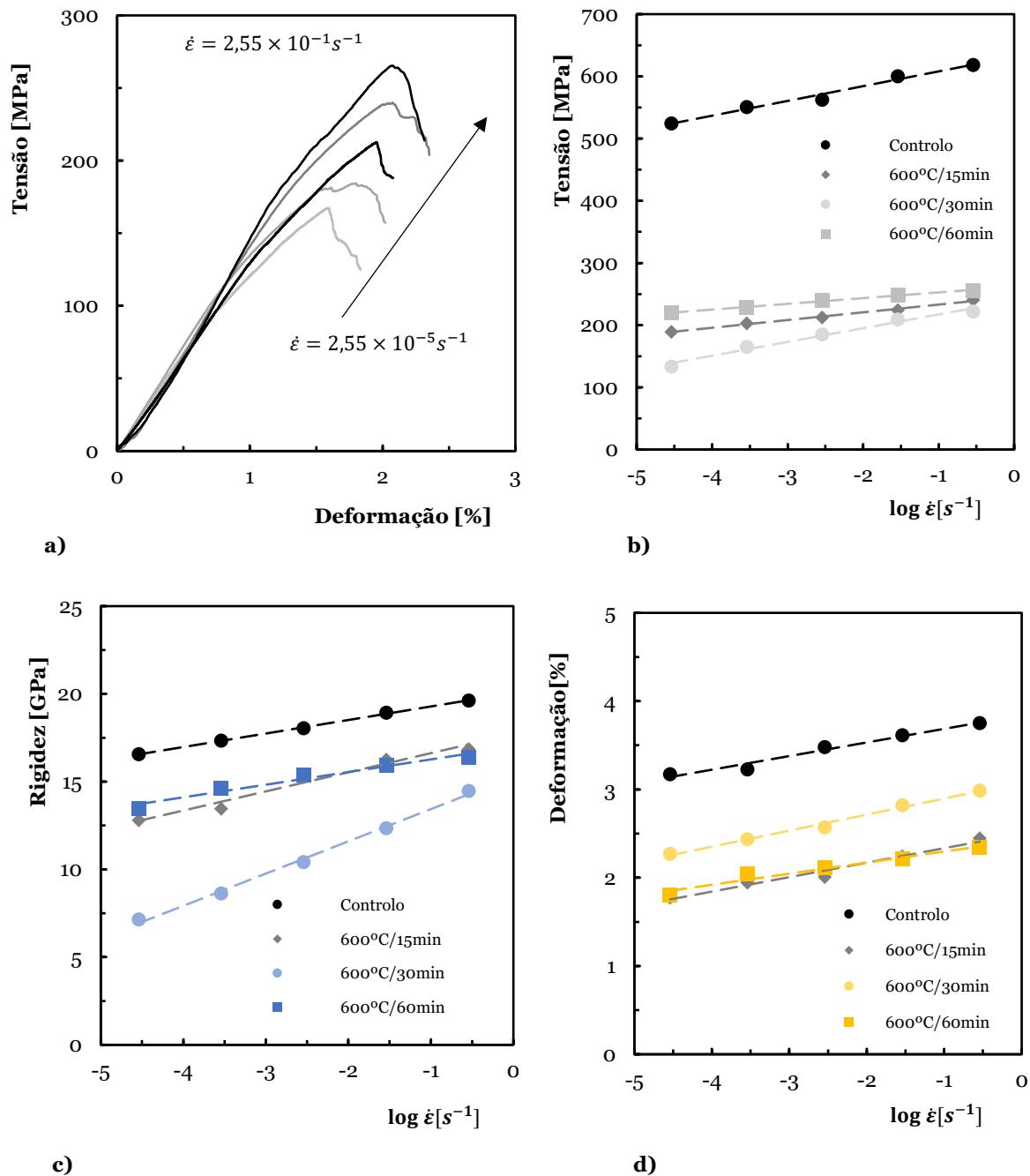


Figura 65 a) Curvas σ - ϵ representativas para laminado de fibras recuperadas a 600°C durante 60 minutos para as diferentes taxas de deformação; Efeito da taxa de deformação: b) Tensão de flexão; c) Rigidez de flexão; d) Deformação de flexão.

Na Figura 66a) apresentam-se as curvas representativas do laminado das fibras recicladas a 800°C, o das fibras recuperadas após 10min, sendo possível observar que mais uma vez existe uma tendência de crescimento da tensão máxima atingida com o aumento da taxa de deformação, semelhante à observada no laminado de controle. Considerando a tensão para a taxa de deformação $2,72 \times 10^{-5} s^{-1}$, 81,40 MPa, e a tensão para a taxa de deformação $2,72 \times 10^{-4} s^{-1}$, 126,74 MPa, é possível observar que houve um crescimento de cerca de 56%.

As Figuras 66b), c) e d) mostram a evolução da tensão, rigidez e deformação, respetivamente, com o logaritmo da taxa de deformação. No caso da rigidez, é observável que para alguns valores do logaritmo da taxa de deformação, esta se encontra bastante abaixo de valores semelhantes noutras temperaturas. Para esta temperatura é observável uma quase sobreposição das linhas de tendência para a tensão e deformação, o que pode indicar que o tempo de queima a que as fibras foram submetidas se torna irrelevante, tal é o dano a que estas são submetidas quando recicladas à temperatura de 800°C.

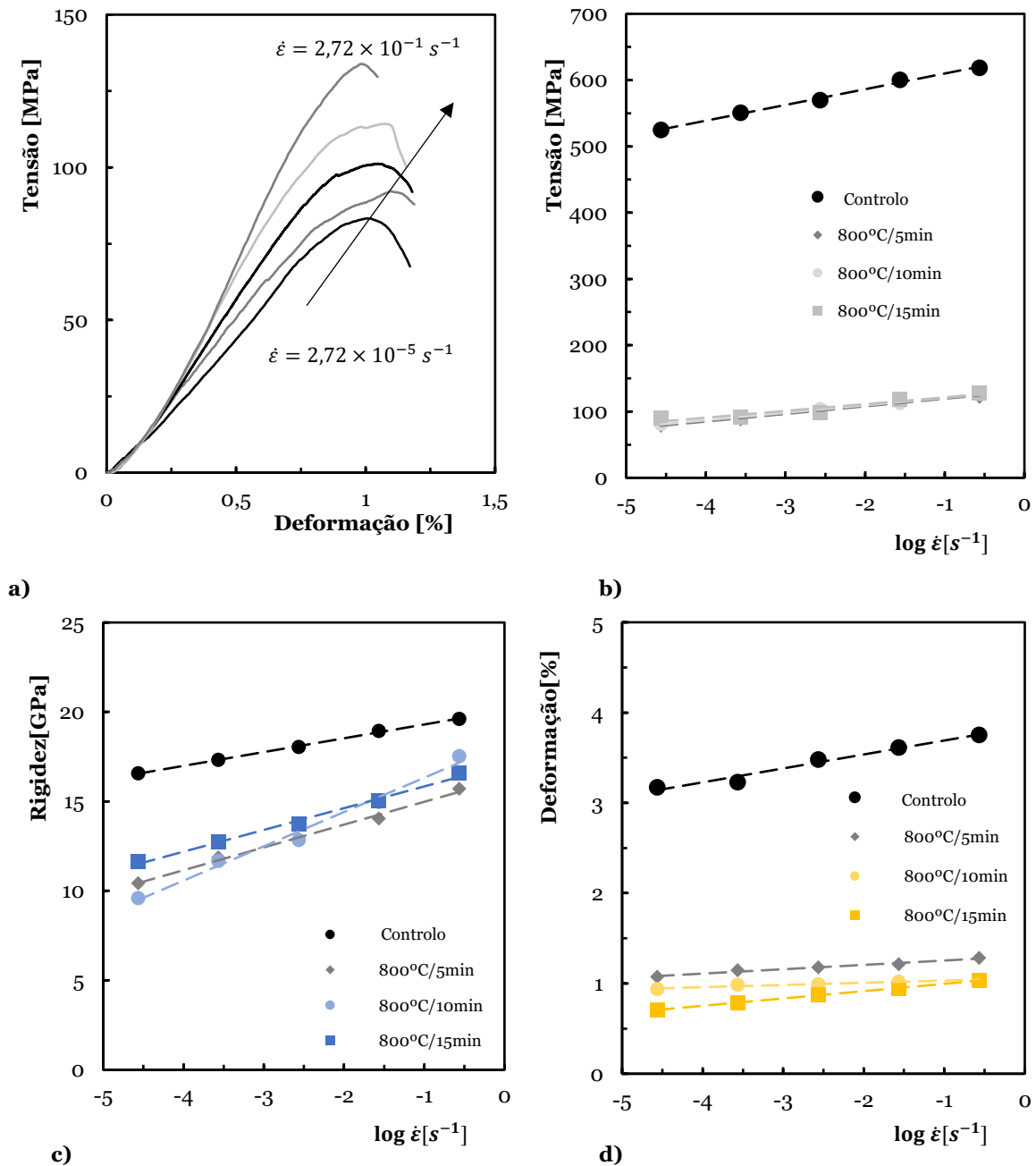


Figura 66 - a) Curvas σ - ϵ representativas para laminado de fibras recuperadas a 800°C durante 10 minutos para as diferentes taxas de deformação; Efeito da taxa de deformação: b) Tensão de flexão; c) Rigidez de flexão; d) Deformação de flexão.

Independentemente da tendência que os laminados apresentam no que diz respeito às propriedades mecânicas avaliadas, conforme é sugerido por Santos et al. (2020) e Silva et al. (2019), podem ser sempre reduzidos a equações lineares de acordo com as equações que representam tensão, rigidez e deformação, respetivamente,

$$\sigma = c + d \times \dot{\epsilon} \quad (7)$$

$$E = c + d \times \dot{\epsilon} \quad (8)$$

$$\varepsilon = c + d \times \dot{\epsilon} \quad (9)$$

Em que σ é a tensão de flexão máxima, E o modulo de flexão, ε a deformação na tensão de flexão máxima, $\dot{\epsilon}$ o logaritmo da taxa de deformação e c e d são as constantes observáveis na Tabela 11. Nesta é então possível consultar os parâmetros que dizem respeito a estas equações, assim como o seu coeficiente de correlação, comprovando que existe uma relação linear entre o logaritmo da taxa de deformação e as propriedades mecânicas avaliadas, permitindo assim a adoção de um modelo que permite prever o comportamento dos laminados, como referido anteriormente.

Tabela 11 – Parâmetros da equação que representa o efeito da taxa de deformação.

Laminado	Propriedade	c	d	R
Controlo	σ	23,7270	633,000	0,9901
	E	0,7704	20,0920	0,9993
	ε	0,1543	3,8492	0,9863
400°C/180min	σ	27,0410	433,2700	0,9816
	E	0,2133	18,9010	0,9996
	ε	0,1684	2,8279	0,9975
600°C/60min	σ	9,2074	261,8800	0,9976
	E	0,7198	16,9830	0,9829
	ε	0,1256	2,4224	0,9756
800°C/10min	σ	11,2570	131,97	0,9976
	E	1,9165	18,2400	0,9930
	ε	0,0244	1,0565	0,9741

6.2.3 Ensaio de Fluência e Relaxação de Tensões

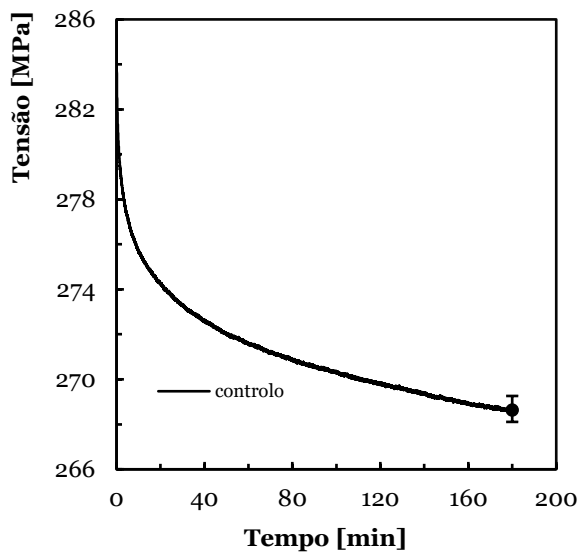
De modo a melhor compreender o comportamento viscoelástico dos materiais estudados, e como referido anteriormente, procedeu-se a um estudo em termos de fluência e relaxação de tensões dos laminados que apresentaram as melhores propriedades nos ensaios estáticos F3P. Estes ensaios permitem prever a estabilidade dimensional e resistência a longo prazo dos laminados (Silva et al., 2019). Assim, na Figura 67 são apresentados os resultados dos ensaios de relaxação de tensões do laminado de controlo e dos laminados de fibras recuperadas a 400°C durante 180 minutos, 600°C durante 60 minutos e 800°C durante 10 minutos, e que se caracterizam pela aplicação da tensão ir reduzindo ao longo do tempo enquanto a deformação se mantém constante. As bandas finais representam os valores máximos e mínimos obtidos para cada condição analisada.

A Figura 67a) apresenta a curva de relaxação de tensão do laminado de controlo à flexão, realizada à temperatura ambiente, ou seja, uma diminuição da tensão de cerca de 5,84% face ao valor inicial de 285,0 MPa, atingindo 268,64 MPa após 180 minutos. O valor inicial, como referido anteriormente, representa 50% da tensão no ensaio de F3P. É possível notar que ocorre uma relaxação mais acentuada nos primeiros 30 minutos, representando cerca de 4,22%, enquanto nos restantes 150 minutos a redução é de apenas de 1,70%.

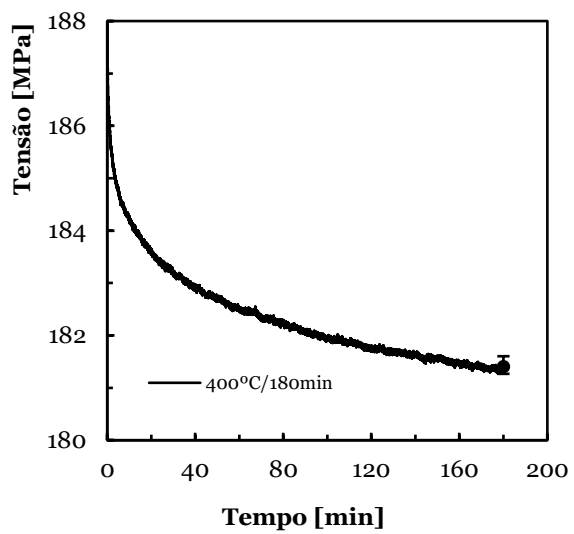
Na Figura 67b) é possível observar a curva de relaxação de tensão do laminado de fibras recuperadas durante 180 minutos a 400°C, a que apresentou as melhores propriedades quando submetido a ensaios de F3P. Com uma tensão inicial de 188,0MPa, sofreu uma relaxação de 3,5%, atingindo um valor final de 181,40MPa. De igual modo ao laminado de controlo, aos 30 minutos já tinha ocorrido a maior fatia de relaxação, tendo ocorrido uma diminuição da tensão de 2,62%, enquanto do decorrer do restante ensaio, a redução foi de 0,96%.

A Figura 67c) apresenta o ensaio de relaxação de tensão do laminado das melhores fibras recuperadas a 600°C, que apresenta a maior relaxação, visto que, para a tensão inicial de 120MPa, sofreu uma diminuição de 9,21% aos 180 minutos, traduzindo-se numa tensão final de 109MPa. Analisando também após 30 minutos, observa-se uma redução de 6,82%, e 2,56% nos restantes 150 minutos.

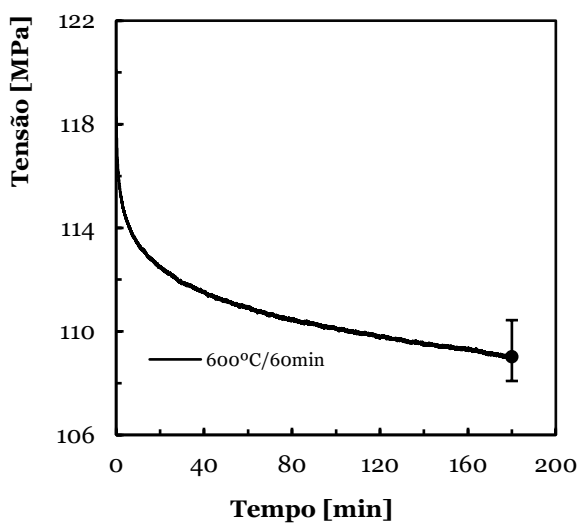
Na Figura 67d) é possível observar a curva de relaxação de tensão do laminado das fibras recuperadas a 800°C durante 10 minutos. De modo semelhante ao laminado de controlo, este apresenta uma redução de 4,43% aos 30 minutos e 6,06% aos 180 minutos.



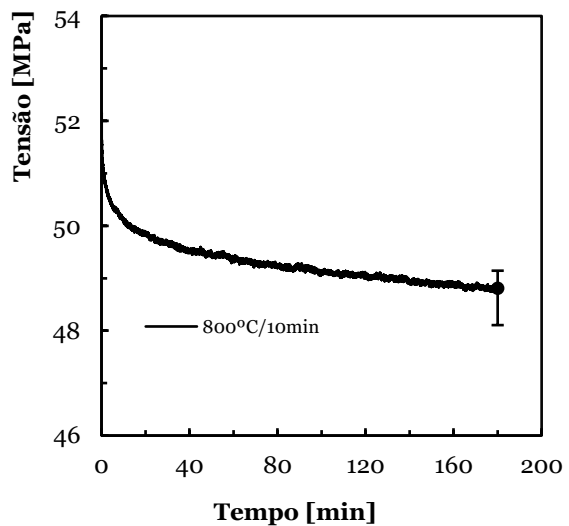
a)



b)



c)



d)

Figura 67 – Curvas de relaxação de tensões para os laminados de: a) Controle, b) 400°C/180min, c) 600/60min, d) 800°C/10min.

Na Tabela 12 apresenta-se de forma resumida o comportamento de relaxação de tensões dos vários laminados em estudo quando submetidos a uma tensão de flexão inicial σ_0 . Todos eles apresentaram relaxação de tensões mesmo à temperatura ambiente e de acordo com o reportado por Santos et al. (2020), verificou-se também a existência de um regime inicial em que a tensão diminuiu consideravelmente em relação ao tempo restante, comportamento típico deste tipo de compósitos.

Em comparação com o laminado de controle, o laminado das fibras recuperadas a 400°C durante 180 minutos apresentou um melhor comportamento, ao contrário dos restantes, o

que se deve como constatado nos ensaios de F3P ao valor da rigidez, a um aumento da mesma em comparação com o laminado de controlo. Também em termos de dispersão dos resultados ao fim de 180 minutos, para este tempo e temperatura, os resultados são semelhantes à dispersão dos resultados da relaxação de tensões para o laminado de controlo.

Tabela 12 – Comportamento em termos de relaxação de tensões dos laminados em estudo.

Laminado	σ_0 [MPa]	↓30min	↓180min	σ_{180} [MPa]
Controlo	285	4,221%	5,844%	268,635
400°C/180min	188	2,616%	3,552%	181,402
600°C/60min	120	6,822%	9,207%	109,030
800°C/10min	52	4,432%	6,062%	48,810

Já na Figura 68, são apresentados os gráficos de fluência relativos ao laminado de controlo e também dos laminados que apresentaram as melhores propriedades nos ensaios de F3P para cada temperatura de queima. Estes testes permitem medir as variações do deslocamento que ocorrem quando o material é submetido a uma tensão constante (ASTM, 2009).

A evolução da deformação em função do tempo de um laminado, a uma temperatura fixa e sujeito a uma carga constante é apresentada sob a forma de uma curva de deformação versus tempo na Figura 68. Em todas as curvas, ocorrem três fases, sendo que neste caso apenas estão presentes as duas primeiras, uma vez que o tempo considerado foi apenas de três horas. A primeira fase, conhecida por fluência primária ou transitória, é caracterizada por uma velocidade de deformação que diminui ao longo do tempo. Já a zona de fluência secundária é caracterizada por uma velocidade de deformação sensivelmente constante ao longo do tempo e a zona de fluência terciária é aquela em que a velocidade aumenta ao longo do tempo, até ocorrer a rotura (Branco, 1994).

A Figura 68a) apresenta a curva de fluência tipicamente obtida dos testes experimentais do laminado de controlo. Esta apresenta um aumento do deslocamento de 5,26% face ao valor inicial de 1,23mm, atingindo cerca de 1,30mm aos 180 minutos. O valor inicial, como referido anteriormente, representa 50% da tensão no ensaio de F3P. É possível notar que ocorre uma deformação mais acentuada nos primeiros 30 minutos, representando 3,71%.

Na Figura 68b) é possível observar a curva de fluência do laminado de fibras recuperadas durante 180 minutos a 400°C, que apresentou as melhores propriedades quando submetido a ensaios de F3P. Com uma deformação inicial de 0,87mm, sofreu um deslocamento que

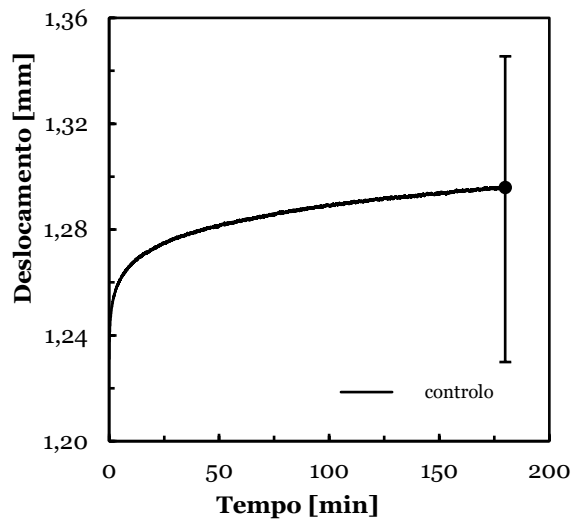
corresponde a 3,57%, atingindo um valor final de cerca de 0,90mm. De igual modo ao laminado de controle, aos 30 minutos já tinha ocorrido a maior porção de deslocamento, tendo ocorrido uma deformação de 2,50%.

A Figura 68c) apresenta o ensaio de fluência do laminado das melhores fibras recuperadas a 600°C, que apresenta a maior deformação, visto que, com um deslocamento inicial de 0,80mm, sofreu uma diminuição de 12,26% aos 180 minutos, traduzindo-se num deslocamento de 0,89mm. Analisando também aos 30 minutos, observa-se uma redução de 8,12%.

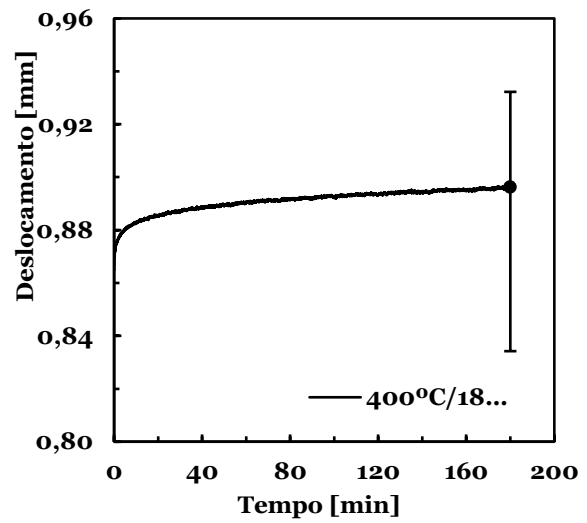
Na Figura 68d) é possível observar a curva de fluência do laminado das fibras recuperadas a 800°C durante 10 minutos. De modo semelhante ao laminado de controle, este apresenta uma redução de 3,52% aos 30 minutos e 5,47% aos 180 minutos. Assim, com um deslocamento inicial de 0,32mm, o deslocamento final é de 0,34mm.

Todos os laminados apresentaram fluência mesmo à temperatura ambiente e a existência de um regime inicial em que a deformação diminuiu consideravelmente em relação ao tempo restante, comportamento típico deste tipo de compósitos, tal como reportado por Santos et al. (2020).

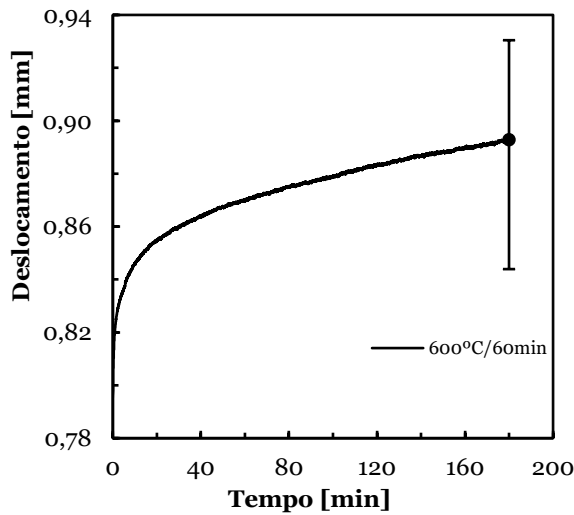
À semelhança da relaxação de tensões também o laminado das fibras recuperadas a 400°C durante 180 minutos apresentou melhor comportamento à fluência, quando comparado com o laminado de controle. Isto deve-se ao seu valor da rigidez, que é superior em comparação com o laminado de controle. Também em termos de dispersão dos resultados ao fim de 180 minutos, os resultados do laminado de fibras recuperadas durante 180 minutos a 400°C são semelhantes à dispersão dos resultados da fluência para o laminado de controle.



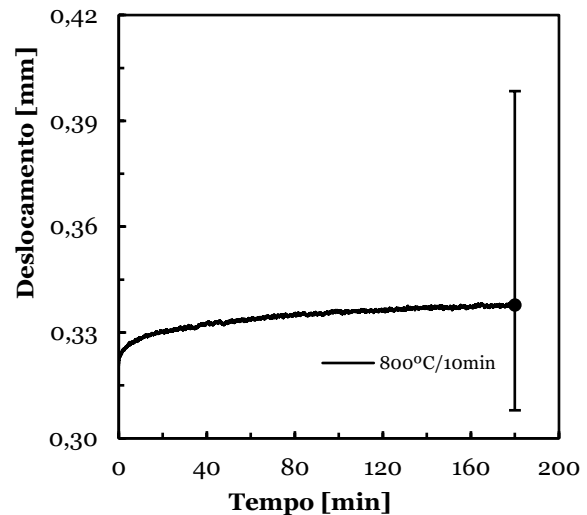
a)



b)



c)



d)

Figura 68 - Gráficos de Deslocamento-Tempo de ensaios de fluência a) Controle, b) 400°C/180min, c) 600°C/60min, d) 800°C/10min.

Na Tabela 13 é possível observar um quadro resumo do comportamento à fluência dos laminados.

Tabela 13 – Comportamento em termos de fluência dos laminados em estudo.

Laminado	ϵ_0 [mm]	$\uparrow 30\text{min}$	$\uparrow 180\text{min}$	ϵ_{180} [mm]
Controle	1,231	3,713%	5,255%	1,296
400°C/180min	0,865	2,504%	3,583%	0,896
600°C/60min	0,796	8,112%	12,246%	0,893
800°C/10min	0,320	3,522%	5,395%	0,338

Capítulo 7

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre o estudo efetuado, assim como as limitações associadas ao seu desenvolvimento, e apresentam-se propostas para trabalho futuro de modo a dar continuidade a esta investigação.

7.1 Conclusões

Considerando os objetivos inicialmente definidos e após análise e discussão de resultados referente ao caso prático desenvolvido, é possível traçar algumas conclusões quanto à possibilidade de inserção de novos laminados no *loop* de materiais, permitindo encerrar o CV das pás de rotor dos aerogeradores.

Os ensaios dos provetes à tração permitem concluir que, com o aumento do tempo de queima das fibras e consequente degradação das mesmas, ocorre uma diminuição da resistência destas à tração. Através de fotografia microscópica foi também possível concluir que com o aumento da temperatura, o modo de dano dos laminados tornou-se progressivamente menos dúctil.

Nos ensaios de flexão em 3 pontos, o laminado de fibras recuperadas a 400°C durante 180 minutos destaca-se de todas as por apresentar a menor redução em termos percentuais, quando comparado com as propriedades do laminado de controlo.

No que diz respeito às fibras recuperadas a 800°C, as suas propriedades apresentam valores tão baixos que o tempo de queima a que estas são submetidas se torna irrelevante, visto que todo o próprio processo se torna prescindível por não acrescentar valor ao material.

O estudo do comportamento viscoelásticos dos laminados fabricados a partir de fibras recicladas permite compreender o comportamento dos mesmos a diferentes taxas de deformação, revelando-se semelhante, mas, na maioria dos casos, com valores inferiores ao laminado de controlo. Mesmo à temperatura ambiente e independentemente do tipo de fibra, os testes de relaxação de tensão mostram que a tensão diminui ao longo do tempo. Em termos de comportamento de fluência, e independente do tipo de fibra, o deslocamento aumenta com o tempo.

Indo de encontro ao objetivo inicial, que era abordar esta problemática sob uma perspetiva de Economia Circular, procurou-se identificar possíveis aplicações para os laminados que resultaram das fibras recicladas. Sendo que, devido à perda de propriedades estes não podem ser inseridos num novo ciclo de vida enquanto materiais de peças estruturais que sejam sujeitas a grandes esforços mecânicos, sugere-se por isso uma alternativa que pode ser benéfica, a sua utilização na indústria automóvel para a produção de elementos não estruturais.

Respeitando a Diretiva a 2000/53/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, pelo menos 80% dos materiais de um veículo devem ser materiais reciclados (Parlamento Europeu, 2000). Sendo que a compra de veículos de passageiros tem subido cerca de 10% nos últimos 7 anos (Eurostat, 2022b), a inserção dos laminados de fibra reciclada na produção automóvel representa uma possível solução para ambas as problemáticas.

7.2 Limitações

A limitação que mais se destaca, quando considerada a produção dos laminados, reside na limpeza das fibras recuperadas. Devido à fragilidade das fibras queimadas a altas temperaturas durante muito tempo, torna-se difícil proceder a uma limpeza manual minuciosa sem comprometer a sua estrutura.

Ao nível dos equipamentos, um forno de maiores dimensões, permitiria, por exemplo a recuperação de fibras também com maiores dimensões. Outro tipo de equipamentos de caracterização mecânica, por exemplo, ao nível do impacto, permitiria a uma caracterização mais extensa, realização de ensaios de impacto *charpy* ou impacto de baixa velocidade.

7.3 Propostas de Trabalhos Futuros

Numa perspetiva de continuidade do trabalho, pretende-se avaliar o comportamento para temperaturas inferiores e/ou próximas dos 400°C nomeadamente procurar compreender o fenómeno de aumento de rigidez que ocorre no caso dos laminados das fibras recuperadas a 400°C durante 180min. Pretende-se também testar a possibilidade de produção de laminados com fibra de vidro e núcleo de fibra reciclada, de modo a avaliar de que modo a hibridização de um compósito permitiria manter as propriedades, mas também de que modo a inserção de nanopartículas iria influenciar as propriedades mecânicas.

Numa ótica de utilização das fibras para componentes não estruturais de automóveis, seria também importante realizar ensaios de impacto, para caracterizar o material e avaliar o seu comportamento, mas também caracterizar os materiais comumente encontrados no

habitáculo do automóvel e comparar as propriedades para analisar a possibilidade de estes serem inseridos brevemente no seu lugar.

Seria muito importante poder efetuar-se um estudo com materiais reais, sujeitos a um ciclo de vida, isto é, com pás de rotor em fim de ciclo de vida. Só assim, será efetivamente possível validar o método de reciclagem proposto. Numa fase seguinte será importante estudar a escalabilidade do método para contexto industrial, incluindo estudo sobre a viabilidade económica do mesmo.

Bibliografia

Ahmadi, M., Sadighi, M. & Hosseini-Toudeshky, H. (2022) Microstructure-based deformation and fracture modeling of particulate reinforced composites with ordinary state-based peridynamic theory. *Composite Structures*. 279, 114734. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114734.

Altenbach, H., Altenbach, J. & Wolfgang, K. (2018) Classification of Composite Materials. In: *Mechanics of Composite Structural Elements*. Singapore, Springer Singapore. pp. 3–18. doi: 10.1007/978-981-10-8935-0_1.

Anbusagar, N.R.R., Palanikumar, K. & Giridharan, P.K. (2015) Study of sandwich effect on nanoclay modified polyester resin GFR face sheet laminates. *Composite Structures*. 125, 336–342. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.02.016.

Andrew, J.J. & Dhakal, H.N. (2022) Sustainable biobased composites for advanced applications: recent trends and future opportunities – A critical review. *Composites Part C: Open Access*. 7, 100220. doi: 10.1016/J.JCOMC.2021.100220.

Aparicio, I.E., Fishpool, D.T., Diaz, V.R., Dorey, R.A. & Yeomans, J.A. (2022) Evaluation of polymer matrix composite manufacturing routes for production of an oxide/oxide ceramic matrix composite. *Journal of the European Ceramic Society*. 42 (5), 2420–2428. doi: 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2021.12.059.

APREN (2022) *Evolução da Potência Instalada em Portugal*. 2022. Potência. <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/potencia> [Accessed: 28 September 2022].

Ashby, M.F. (2021) *Materials and the Environment*. Elsevier. doi: 10.1016/C2016-0-04008-1.

ASTM (2020) *ASTM D3878-20 Standard Terminology for Composite Materials*.

ASTM (2014) *D638 – 14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*.

ASTM (2009) *D2990 - 09: Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep Rupture of Plastics*.

Bahraini, A. (2021) *The Triple Bottom Line of Sustainability in Waste Management*. Waste 4 Change. Available from: <https://waste4change.com/blog/the-triple-bottom-line-of-sustainability-in-waste-management> [Accessed: 4 July 2022]

Baturkin, D., Hisseine, O.A., Masmoudi, R., Tagnit-Hamou, A. & Massicotte, L. (2021) Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*. 174, 105807. doi: 10.1016/J.RESCONREC.2021.105807.

BCSD Portugal (2021) *O que é a Sustentabilidade?* 2021. BCSD Portugal. Available from: <https://bcdportugal.org/sustentabilidade/> [Accessed: 21 June 2022].

Bernatas, R., Dagreou, S., Despax-Ferreres, A. & Barasinski, A. (2021) Recycling of fiber reinforced composites with a focus on thermoplastic composites. *Cleaner Engineering and Technology*. 5, 100272. doi: 10.1016/J.CLET.2021.100272.

Bhat, R., Mohan, N., Sharma, S., Pratap, A., Keni, A.P. & Sodani, D. (2019) Mechanical testing and microstructure characterization of glass fiber reinforced isophthalic polyester composites. *Journal of Materials Research and Technology*. 8 (4), 3653–3661. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.06.003.

Bhattacharjee, A. (2012) *Social Science Research: Principles, Methods, and Practices*. 2nd edition. Tampa, Global Text Project. https://digitalcommons.usf.edu/oa_textbooks/3/.

Biron, M. (2013) Composites. In: *Thermosets and Composites*. Elsevier. pp. 299–473. doi: 10.1016/B978-1-4557-3124-4.00006-7.

Bjørn, A. & Hauschild, M.Z. (2018) Cradle to Cradle and LCA. In: *Life Cycle Assessment*. Cham, Springer International Publishing. pp. 605–631. doi: 10.1007/978-3-319-56475-3_25.

Bourguignon, D. (2022) *Strategy for secondary raw materials*. 20 May 2022. New boost for jobs, growth and investment. Available from: <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/carriage/strategy-for-secondary-raw-materials/report?sid=6001> [Accessed: 26 June 2022].

Branco, C.A.G. de M. (1994) *Mecânica dos Materiais*. 2ª edição. Porto, Fundação Calouste Gulbenkian.

Brundtland, G.H. (1987) *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. Available from: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. [Accessed: 28 October 2021].

BS (2003) *BS EN ISO 178:2003 Plastics - Determination of Flexural Properties*.

Callister Jr., W.D. (1999) *Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução*. 5^a. Salt Lake City, LTC.

Chawla, K.K. (2019) *Composite Materials*. Cham, Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-28983-6.

Clyne, T.W. & Hull, D. (2019) *An Introduction to Composite Materials*. 3rd edition. Cambridge University Press.

Comissão Europeia (2020) *Um novo Plano de Ação para a Economia Circular*. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098&from=EN>. [Accessed: 23 July 2022].

Construcía (2022) *Descubra o que é o Cradle to Cradle*. 2022. Metodologia. Available from: <https://www.construcia.com/pt/cradle-to-cradle/> [Accessed: 28 June 2022].

D'Amato, D., Droste, N., Allen, B., Kettunen, M., Lahtinen, K., Korhonen, J., Leskinen, P., Matthies, B.D. & Toppinen, A. (2017) Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. *Journal of Cleaner Production*. 168, 716–734. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.053.

Davidsson, S., Grandell, L., Wachtmeister, H. & Höök, M. (2014) Growth curves and sustained commissioning modelling of renewable energy: Investigating resource constraints for wind energy. *Energy Policy*. 73, 767–776. doi: 10.1016/J.ENPOL.2014.05.003.

Demircan, G., Özen, M. & Kisa, M. (2020) Cam Fiber Takviyeli Epoksi Kompozitleri Farklı Yükleme Hızlarında Eğilme Özellikleri. *Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik*. 22 (64), 271–276. doi: 10.21205/deufmd.2020226426.

DGEG (2021a) *Balanço Energético Nacional 2020*. Available from: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/balancos-energeticos/balancos-energeticos-nacionais/>. [Accessed: 23 March 2022].

DGEG (2021b) *Balanço Energético Sintético 2020*. Available from: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/> [Accessed: 23 March 2022].

DGEG (2022) *Estatísticas rápidas das renováveis*. Available from: <https://www.dgeg.gov.pt/media/uokmuwxu/renovaveis-202203.pdf>. [Accessed: 23 March 2022].

DGEG (2021c) *Potência Instalada nas Centrais Produtoras de Energia Elétrica*. Available from: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/> [Accessed: 23 March 2022].

DGEG (2021d) *Produção anual e potência instalada - 2008-2020*. Available from: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/> [Accessed: 23 March 2022].

Dorigato, A. (2021) Recycling of thermosetting composites for wind blade application. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 4 (2), 116–132. doi:10.1016/J.AIEPR.2021.02.002.

Edirisuriya, A., Weerabahu, S. & Wickramarachchi, R. (2018) Applicability of Lean and Green Concepts in Logistics 4.0: A Systematic Review of Literature. In: *2018 International Conference on Production and Operations Management Society (POMS)*. 2018 pp. 1–8. doi: 10.1109/POMS.2018.8629443.

Eldaim, A., Mohmmed, R. & Seeahmed, A. (2021) Mechanical behavior of woven glass fiber-epoxy composite laminates with variable fiber orientations. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 3, 16–21. doi: 10.29121/ijesrt.v10.i11.2021.2.

Ellen MacArthur Foundation (2017) *Economia Circular*. 2017. Available from: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/diagrama-sistemico> [Accessed: 31 May 2022].

Ellen MacArthur Foundation (2022) *The biological cycle of the butterfly diagram*. 2022. Available from: <https://ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-biological-cycle-of-the-butterfly-diagram> [Accessed: 17 July 2022].

Esteva, L.C.A., Kasliwal, A., Kinzler, M.S., Chul Kim, H., Keoleian, G.A. & Gregory Keoleian, C.A. (2020) Circular economy framework for automobiles Closing energy and material loops. *Journal of Industrial Ecology*, 1;25:877–889. doi: 10.1111/jieec.13088.

European Environment Agency (2022) *Eco-industry*. 2022. EEA Glossary. Available from: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/eco-industry> [Accessed: 30 June 2022].

Eurostat (2022) *Circular Economy Indicators*. 2022. Circular Economy - Monitoring Framework. Available from: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/indicators/monitoring-framework> [Accessed: 28 June 2022].

Eurostat (2021) *Circular material use rate*. 2021. Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_SRM030__custom_354994/default/table?lang=en&bookmarkId=c6638243-2f7f-4256-b2fd-6a5159b4b68a [Accessed: 28 June 2022].

Fonte, R. & Xydis, G. (2021) Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. *Journal of Environmental Management*. 287, 112269. doi: 10.1016/J.JENVMAN.2021.112269.

Giorgini, L., Leonardi, C., Mazzocchetti, L., Zattini, G., Cavazzoni, M., Montanari, I., Tosi, C. & Benelli, T. (2016) Pyrolysis of fiberglass/polyester composites: Recovery and characterization of obtained products. *FME Transaction*, 44 (4), 405–414. doi: 10.5937/fmet1604405G.

Golden, S. (2021) The circular economy meets decommissioned wind turbine blades. *GreenBiz*. Available from: <https://www.greenbiz.com/article/circular-economy-meets-decommissioned-wind-turbine-blades>. [Accessed: 28 August 2022].

Gureva, M.A. & Deviatkova, Y.S. (2020) Formation of the concept of a circular economy. *Sistemas & Gestão*. 15 (2), 156–169. doi: 10.20985/1980-5160.2020.v15n2.1656.

Hagnell, M.K. & Åkermo, M. (2019) The economic and mechanical potential of closed loop material usage and recycling of fibre-reinforced composite materials. *Journal of Cleaner Production*. 223, 957–968. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.03.156.

Hao, S., Kuah, A.T.H., Rudd, C.D., Wong, K.H., Lai, N.Y.G., Mao, J. & Liu, X. (2020) A circular economy approach to green energy: Wind turbine, waste, and material recovery. *Science of The Total Environment*. 702, 135054. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135054.

Hepler, L. (2015) *Defining the circular economy*. 24 August 2015. GreenBiz 101. Available from: <https://www.greenbiz.com/article/defining-circular-economy> [Accessed: 28 June 2022].

Hersh, M.A. (2006) The Economics and Politics of Energy Generation. In: *Improving Stability in Developing Nations through Automation 2006*. Elsevier. pp. 77–82. doi: 10.1016/B978-008045406-1/50011-2.

Homrich, A.S., Galvão, G., Abadia, L.G. & Carvalho, M.M. (2018) The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. *Journal of Cleaner Production*. 175, 525–543. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.11.064.

Hu, J., Xiao, Z., Zhou, R., Deng, W., Wang, M. & Ma, S. (2011) Ecological utilization of leather tannery waste with circular economy model. *Journal of Cleaner Production*. 19 (2–3), 221–228. doi: 10.1016/j.jclepro.2010.09.018.

Iberdrola (2022a) *Ecodesign: como fazer produtos sustentáveis e satisfazer o consumidor*. 2022. O que é o Ecodesign? Available from: <https://www.iberdrola.com/compromisso-social/eco-design-produtos-sustentaveis> [Accessed: 15 July 2022].

Iberdrola (2022b) *O que é a energia eólica, como ela se transforma em eletricidade e quais são suas vantagens?* 2022. Sustentabilidade. Available from: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/energia-eolica> [Accessed: 9 September 2022].

INEGI (2022a) *Energias Endógenas de Portugal*. May 2022. Total de potência instalada renovável em Portugal. Available from: <https://e2p.inegi.up.pt/#Tec3> [Accessed: 16 May 2022].

INEGI (2022b) *Lista CEPS*. May 2022. Energias Endógenas de Portugal. Available from: <https://e2p.inegi.up.pt/#Tec3> [Accessed: 16 May 2022].

INEGI & APREN (2020) *Parques Eólicos em Portugal*. Available from: <https://e2p.inegi.up.pt/#Tec3> [Accessed: 16 May 2022].

ISO (2008) *NP EN ISO 14040:2008 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*.

Jensen, J.P. & Skelton, K. (2018) Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 97, 165–176. doi: 10.1016/J.RSER.2018.08.041.

Jensen, P.D., Purnell, P. & Velenturf, A.P.M. (2020) Highlighting the need to embed circular economy in low carbon infrastructure decommissioning: The case of offshore wind. *Sustainable Production and Consumption*. 24, 266–280. doi: 10.1016/j.spc.2020.07.012.

Jiao, W. & Boons, F. (2014) Toward a research agenda for policy intervention and facilitation to enhance industrial symbiosis based on a comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*. 67, 14–25. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.12.050.

Kalkanis, K., Psomopoulos, C.S., Kaminaris, S., Ioannidis, G. & Pachos, P. (2019) Wind turbine blade composite materials - End of life treatment methods. *Energy Procedia*. 157, 1136–1143. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2018.11.281.

Karuppanan Gopalraj, S. & Kärki, T. (2020) A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. *SN Applied Sciences*. 2 (3), 433. doi: 10.1007/s42452-020-2195-4.

Korniejenko, K., Kozub, B., Bąk, A., Balamurugan, P., Uthayakumar, M. & Furtos, G. (2021) Tackling the Circular Economy Challenges—Composites Recycling: Used Tyres, Wind Turbine Blades, and Solar Panels. *Journal of Composites Science*. 5 (9), 243. doi: 10.3390/jcs5090243.

Krauklis, A.E., Karl, C.W., Gagani, A.I. & Jørgensen, J.K. (2021) Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s. *Journal of Composites Science*. 5 (1). doi: 10.3390/jcs5010028.

Lee, J. & Zhao, F. (2022) *Global Wind Report 2022*. Available from: https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/04/Annual-Wind-Report-2022_screen_final_April.pdf. [Accessed: 6 April 2022].

Lee, J. & Zhao, F. (2021) *GWEC | Global Wind Report 2021*. Available from: <https://gwec.net/global-wind-report-2021/> [Accessed: 6 April 2022].

Leite, L.M.M. (2020) *Reciclagem de Pás de Rotor de Aerogeradores Eólicos: Desafios e Oportunidades*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial. Universidade da Beira Interior. Available from: <https://ubibliorum.ubi.pt/handle/10400.6/11600>. [Accessed: 26 November 2022].

Liu, P. & Barlow, C.Y. (2017) Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*. 62, 229–240. doi: 10.1016/J.WASMAN.2017.02.007.

Mallick, P.K. (2018) Particulate and Short Fiber Reinforced Polymer Composites. In: P.W.R. Beaumont & C.H. Zweben (eds.). *Comprehensive Composite Materials II*. Elsevier.

Marikkannan, S.K., Gopinath, A., L, N. & Hemanth, R. (2017) Evaluation of mechanical properties of E-Glass and coconut fiber reinforced with polyester and epoxy resin matrices. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 7, 13–20.

Ministério dos Negócios Estrangeiros (2017) *Relatório nacional sobre a implementação da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Available from: https://www.instituto-camoes.pt/images/cooperacao2/relatods17_pt.pdf. [Accessed: 6 October 2021].

Mitchell, B.S. (2003) The Structure of Materials. In: *An Introduction to Materials Engineering and Science*. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 1–135. doi: 10.1002/0471473359.ch1.

Monjon, A., Santos, P., Valvez, S. & Reis, P.N.B. (2022) Hybridization Effects on Bending and Interlaminar Shear Strength of Composite Laminates. *Materials*. 15 (4), 1302. doi: 10.3390/ma15041302.

Mollenkamp, D.T. & Brown, J.R. (2021) *Sustainability*. 15 November 2021. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/s/sustainability.asp> [Accessed: 21 June 2022].

Moriarty, P. & Honnery, D. (2021) The limits of renewable energy. *AIMS Energy*, 9 (4), 812–829. doi: 10.3934/energy.2021037.

Morin, C., Loppinet-Serani, A., Cansell, F. & Aymonier, C. (2012) Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art. *The Journal of Supercritical Fluids*. 66, 232–240. doi: 10.1016/J.SUPFLU.2012.02.001.

Moura, M.F.S.F. de, Morais, A.B. de & Magalhães, A.G. de (2010) *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.

Mulvaney, D., Richards, R.M., Bazilian, M.D., Hensley, E., Clough, G. & Sridhar, S. (2021) Progress towards a circular economy in materials to decarbonize electricity and mobility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 137, 110604. doi: 10.1016/J.RSER.2020.110604.

Naqvi, S.R., Prabhakara, H.M., Bramer, E.A., Dierkes, W., Akkerman, R. & Brem, G. (2018) A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*. 136, 118–129. doi: 10.1016/J.RESCONREC.2018.04.013.

NEOENERGIA (2022) *Você sabe como funciona um aerogerador?* 2022. Available from: <https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-um-aerogerador.aspx> [Accessed: 9 September 2022].

Ngo, T. (2020) *Introduction to Composite Materials*. doi:10.5772/intechopen.91285.

Oliveira, A.D. de & Beatrice, C.A.G. (2019) Polymer Nanocomposites with Different Types of Nanofiller. In: *Nanocomposites - Recent Evolutions*. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.81329.

Oliveira, E. de (2017) Economia verde, economia ecológica e economia ambiental: uma revisão. *Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade*. Available from: <https://www.revistasuninter.com/revistameioambiente/index.php/meioAmbiente/article/view/751>. [Accessed: 30 April 2022].

Oliveira, P.S., Antunes, M.L.P., da Cruz, N.C., Rangel, E.C., de Azevedo, A.R.G. & Durrant, S.F. (2020) Use of waste collected from wind turbine blade production as an eco-friendly ingredient in mortars for civil construction. *Journal of Cleaner Production*. 274, 122948. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122948.

ONU (2015) *Draft outcome document of the United Nations summit for the adoption of the post-2015 development agenda*. Available from: <https://digitallibrary.un.org/record/800852> [Accessed: 2 October 2021].

ONU (2022) *Ensure sustainable consumption and production patterns*. 2022. Statistics Division. Available from: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-12> [Accessed: 26 June 2022].

Pacurariu, R.L., Vatca, S.D., Lakatos, E.S., Bacali, L. & Vlad, M. (2021) A Critical Review of EU Key Indicators for the Transition to the Circular Economy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 18 (16), 8840. doi: 10.3390/ijerph18168840.

Parlamento Europeu (2000) *DIRECTIVA 2000/53/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 18 de Setembro de 2000 relativa aos veículos em fim de vida*. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0053-20130611&from=DE> [Accessed: 4 July 2022].

Parlamento Europeu (2009) *Directiva 2009/125/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 21 de Outubro de 2009 relativa à criação de um quadro para definir os requisitos de concepção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia*. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:PT:PDF> [Accessed: 4 July 2022].

Pegoretti, A. (2021) Towards sustainable structural composites: A review on the recycling of continuous-fiber-reinforced thermoplastics. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 4 (2), 105–115. doi: 10.1016/J.AIEPR.2021.03.001.

Peña, I., Azevedo, I.L. & Ferreira, L.A.F.M. (2017) Lessons from wind policy in Portugal. *Energy Policy*. 103, 193–202. doi: 10.1016/j.enpol.2016.11.033.

Presidência do Conselho de Ministros (2020) Decreto-Lei n.º 102-D/2020. *Diário da República n.º 239/2020, 1º Suplemento, Série I de 2020-12-10*.pp.2–269. Available from: <https://files.dre.pt/1s/2020/12/23901/0000200269.pdf>. [Accessed: 23 January 2022].

Programa Cautelar (2021) *Entrevista ao Doutor Filipe Duarte Santos*. Available from: <https://www.rtp.pt/programa/tv/p40770/e5> [Accessed: 23 January 2022].

Purvis, B., Mao, Y. & Robinson, D. (2019) Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability Science*. 14. doi:10.1017/s0376892900011449.

Rebelco (n.d.) 1195 P Tecido de Vidro. *Ficha Técnica – Tecido de Vidro*.

República Portuguesa - Ambiente e Transição Energética (2019) *Long-Term Strategy for carbon neutrality of the Portuguese economy by 2050*. Available from: <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies>. [Accessed: 23 May 2022].

Rodrigues, Á. (2008) *Parques Eólicos em Portugal*. Available from: https://e2p.inegi.up.pt/relatorios/INEGI_Parques_Dezo8.pdf [Accessed: 16 May 2022].

Ruggerio, C.A. (2021) Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *Science of The Total Environment*. 786, 147481. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.147481.

Santos, P., Valvez, S., Monjon, A. & Reis, P.N.B. (2020) The hybridisation effect on the viscoelastic properties of polymeric composites. *Procedia Structural Integrity*. 28, 1816–1826. doi: 10.1016/j.prostr.2020.11.004.

Santos, P.S.P. dos, Maceiras, A., Valvez, S. & Reis, P.N.B. (2020) Mechanical characterization of different epoxy resins enhanced with carbon nanofibers. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 15 (55), 198–212. doi: 10.3221/IGF-ESIS.55.15.

Schmid, M., Ramon, N.G., Dierckx, A. & Wegman, T. (2020) *Accelerating Wind Turbine Blade Circularity*. Available from: <https://cefic.org/app/uploads/2020/05/Accelarating-wind-turbine-blade-waste-recycling.pdf> [Accessed: 27 May 2022].

Serviço das Publicações da União Europeia (2021) *Economia Circular*. Available from: <https://op.europa.eu/pt/publication-detail/-/publication/c06ece73-c7b4-11eb-a925-01aa75ed71a1/language-pt/format-HTML/source-255915080> [Accessed: 24 April 2022].

Sicomín (2019) *SR 8100 / SD 882X*. Available from: <http://sicomin.com/datasheets/product-pdf94.pdf> [Accessed: 4 February 2022].

Silva, M.P., Santos, P., Sousa, N.N. & Reis, P.N.B. (2019) Strain rate effect on composites with epoxy matrix filled by cork powder. *Material Design & Processing Communications*. 1 (2), e47. doi: 10.1002/mdp2.47.

Silva, S.V. da (2019) *Ellen MacArthur Foundation e o “Diagrama Borboleta”*. 30 October 2019. Blog Cinética Circular. Available from: <https://cineticacircular.wordpress.com/2019/10/30/ellen-macarthur-foundation-e-o-diagrama-borboleta/> [Accessed: 20 July 2022].

Soini, K. & Birkeland, I. (2014) Exploring the scientific discourse on cultural sustainability. *Geoforum*. 51, 213–223. doi: 10.1016/J.GEOFORUM.2013.12.001.

Soutis, C. (2020) Aerospace engineering requirements in building with composites. *Polymer Composites in the Aerospace Industry*. 3–22. doi: 10.1016/B978-0-08-102679-3.00001-0.

Su, B., Heshmati, A., Geng, Y. & Yu, X. (2013) A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. *Journal of Cleaner Production*. 42, 215–227. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.11.020.

Such, M., Ward, C. & Potter, K. (2014) Aligned Discontinuous Fibre Composites: A Short History. *Journal of Multifunctional Composites*. 2 (3), 155–168. doi: 10.12783/issn.2168-4286/2/3/4/Such.

Tukker, A. (2015) Product services for a resource-efficient and circular economy – a review. *Journal of Cleaner Production*. 97, 76–91. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.11.049.

Turcu, C. (2013) Re-thinking sustainability indicators: local perspectives of urban sustainability. *Journal of Environmental Planning and Management*. 56 (5), 695–719. doi: 10.1080/09640568.2012.698984.

Verpoest, I. (2017) Composite Preforming Techniques. In: C.H. Zweben & P. Beaumont (eds.). *Comprehensive Composite Materials II*. Elsevier.

Wen, C.F., Zhao, Y.L. & Liang, R.Z. (2007) Recycle of low chemical potential substance. *Resources, Conservation and Recycling*. 51 (2), 475–486. doi: 10.1016/j.resconrec.2006.10.011.

WindEurope Business Intelligence, Brindley, G., Fraile, D., Ramirez, L. & Komusanac, I. (2022) *Wind energy in Europe: 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026*.

WindEurope Business Intelligence, Komusanac, I., Brindley, G. & Fraile, D. (2020) *Wind energy in Europe in 2019 - Trends and statistics*.

Yang, B., Kozey, V., Adanur, S. & Kumar, S. (2000) Bending, compression, and shear behavior of woven glass fiber–epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*. 31 (8), 715–721. doi: 10.1016/S1359-8368(99)00052-9.

Zhang, H., Hara, K., Yabar, H., Yamaguchi, Y., Uwasu, M. & Morioka, T. (2009) Comparative analysis of socio-economic and environmental performances for Chinese EIPs: case studies in Baotou, Suzhou, and Shanghai. *Sustainability Science*. 4 (2), 263–279. doi: 10.1007/s11625-009-0078-0.

Zweben, C. H. (2005). *Composites: Overview*. doi: 10.1016/B0-12-369401-9/00545-3